

18. 駿河湾田子港における内部波の速度について

緑 川 弘 毅、*¹ 宮 崎 武 晃*²

1972年8月に静岡県田子港において、水深30mの所に係留されたブイ上から三角形に配列したサーミスターを垂下し、水温変動を得た。各点における変動の位相から求めた内部波の速さは0.10~0.35m/secで、計測例の54%は等深線にほぼ直角に岸に向かっており、反対に港口へ向かうものが全体の約15%あった。

周期は2~3分のものが最も多く、これらは夏期の安定な成層海に生ずる内部安定性波と考えられる。

個々の波形の位相差を計算してこれらの内部波の速度を求め、相互の水温変動記録から求めた水平コヒーレンスと位相を用いて検討を行った。その結果、本研究における速度の計算とかなり良い一致がみられた。

Observations of Internal Wave Velocities

Koki MIDORIKAWA*³, Takeaki MIYAZAKI*⁴

Water temperature measurements were made during the summer with thermistors suspended in a small triangular array from an anchored buoy in Tago Harbour located on the east coast of Suruga Bay, and the results indicated internal waves having a period of several minutes.

Individual wave velocities obtained were in the range of 0.10—0.35 m/sec in the observation-depth of 30 meters. The dominant travel direction (54% of all cases) was onshore and perpendicular to the depth contours, but in some cases (about 15% of all the cases) internal waves propagating toward the mouth of the harbour were observed, these waves might be generated at the innermost-shore.

The wave velocities were discussed by means of horizontal coherence and phase between the temperature records.

1. ま え が き

先の報告で著者は駿河湾における内部波の観測について述べたが(MIDORIKAWA, 1973)、その中で内部波の速さの実測値はKEULEGAN (1953)やLONG (1956)の理論式から導かれた値に比べて小さいことを述べた。UFFORD (1974)は内部波の速度を最初に実測し、議論を行っている。彼の報告によると、実測値はやはり理論値に比べて小さい傾向にあるが、その原因等については明確ではない。彼のそのときに得た内部波の速さは0.5 m/sec以下の

値であった。GAUL (1961)がテキサスタワー4の付近で測定した値は、もう少し大きく0.37~0.65 m/secであった。著者らが港内において行なった速さの値は、これらの値よりもっと小さく0.2 m/sec程度のものが多かった。

1972年の8月、著者らは田子港(図1)において、幅10m、長さ25mの大型ブイ上から観測を行なった。観測点(34°48'36"N, 138°45'50"E)の水深は約30mで、ブイは4点係留を行っているため、動揺による内部波速度の誤差は少ないと考えられる。3個のサーミスタは三角形ABCの各頂点から海面下18mに

*¹ 研修部

*² 海洋開発技術部

*³ Training Department

*⁴ Marine Development Technology Department

垂下した。最も短かい辺 AB の長さは 10.8 m で、これは等深線に直角方向である。他の辺の長さ AC 及び BC はそれぞれ 12.8 m と 16.8 m で、それらの配列は第 3 図の右上に挿入してある。それぞれのサーミスタ素子の反応速度は 2 秒で、水温変動は記録紙に連続記録を行った。この水温測定期間は 8 月 3 日から 24 日までの 3 週間である。この期間に流れの測定は、自記式の微流速計を用いて海面下 10 m において 5 分間隔で行った。水温と塩分の鉛直分布は電気式塩分水温メータを用いて、海面下 0, 3, 5, 8, 10, 13, 15, 18, 20, 25 及び 30 m の各点の測定から求めた。

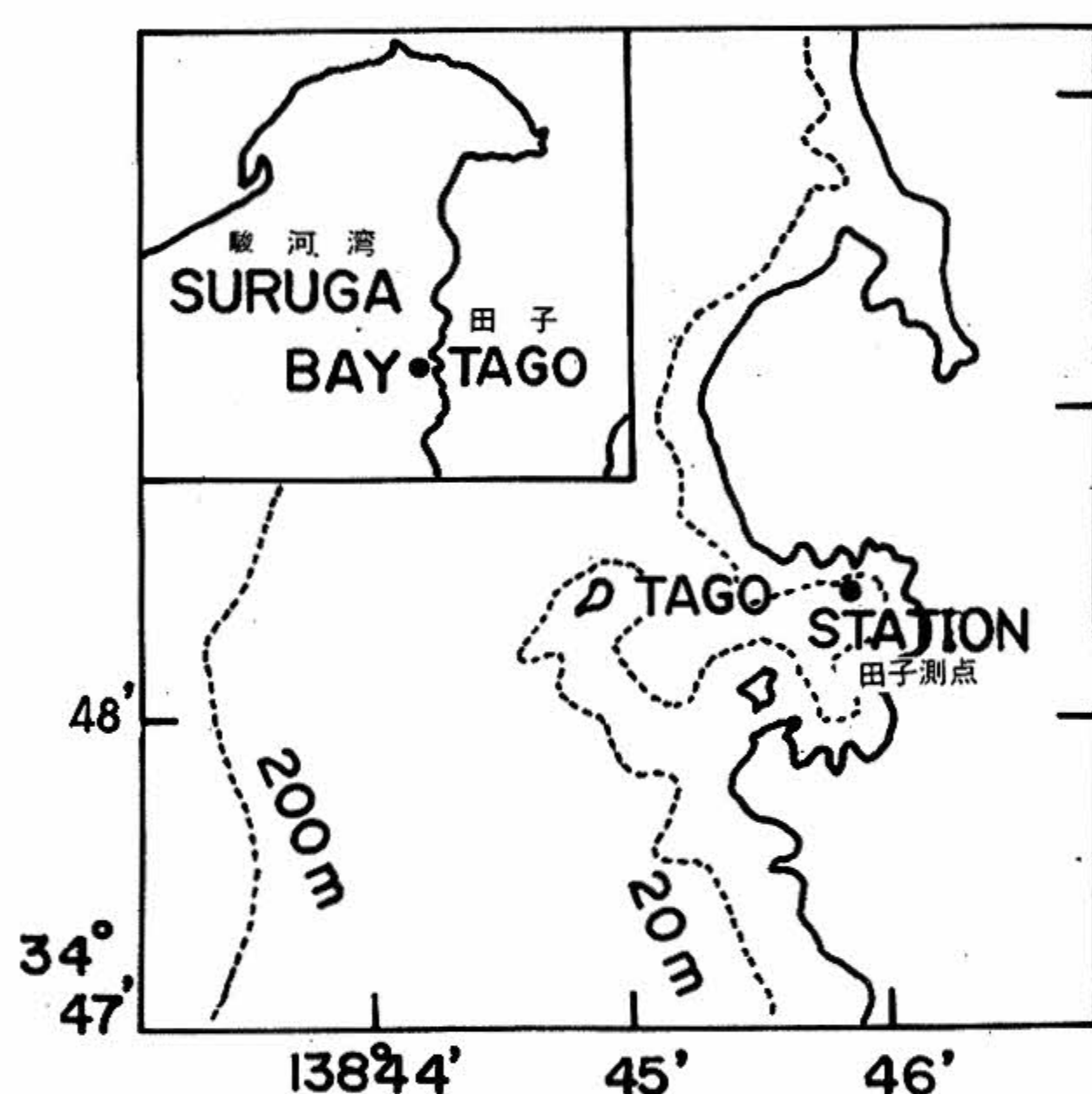


図 1 観測位置 1 Location of station

2. 内部波速度の算出

記録紙上に現れた各点における水温変動の中から、波形が明瞭に数波続いて認められ且つ各点間の位相のずれが 1/4 波長以内のものを 90 例選んで内部波速度の算出に用いた。一連の水温記録の波形の平均値から一波長の値を決めた。そして各点間の波頂（あるいは谷）の位相のずれを計り、内部波の速さと方向を求めた。

水平方向の流れは、たかだが 0.1 m/sec 程 (K. MIDORIKAWA, 1975) であったので流れによる波速度の補正は行わなかった。

内部波の伝播方向は方位を 45° の扇状に、速さ 0.05 m/sec 毎に区分けして分布を示した。それらの結果は第 2 図にまとめて表示した。全体の 54% が N~NE 方向に向かっているが、これは等深線にほぼ垂直に岸向きであることが分る (図 1 参照)。港奥へ、

すなわち東へ向かうものは 20% 程であった。これとは反対向きに港口へ、すなわち西へ向かうものが 14% あったことは興味深いことである。これらの内部波は港奥の砕波帯付近で発生したのではないかと考えられる。

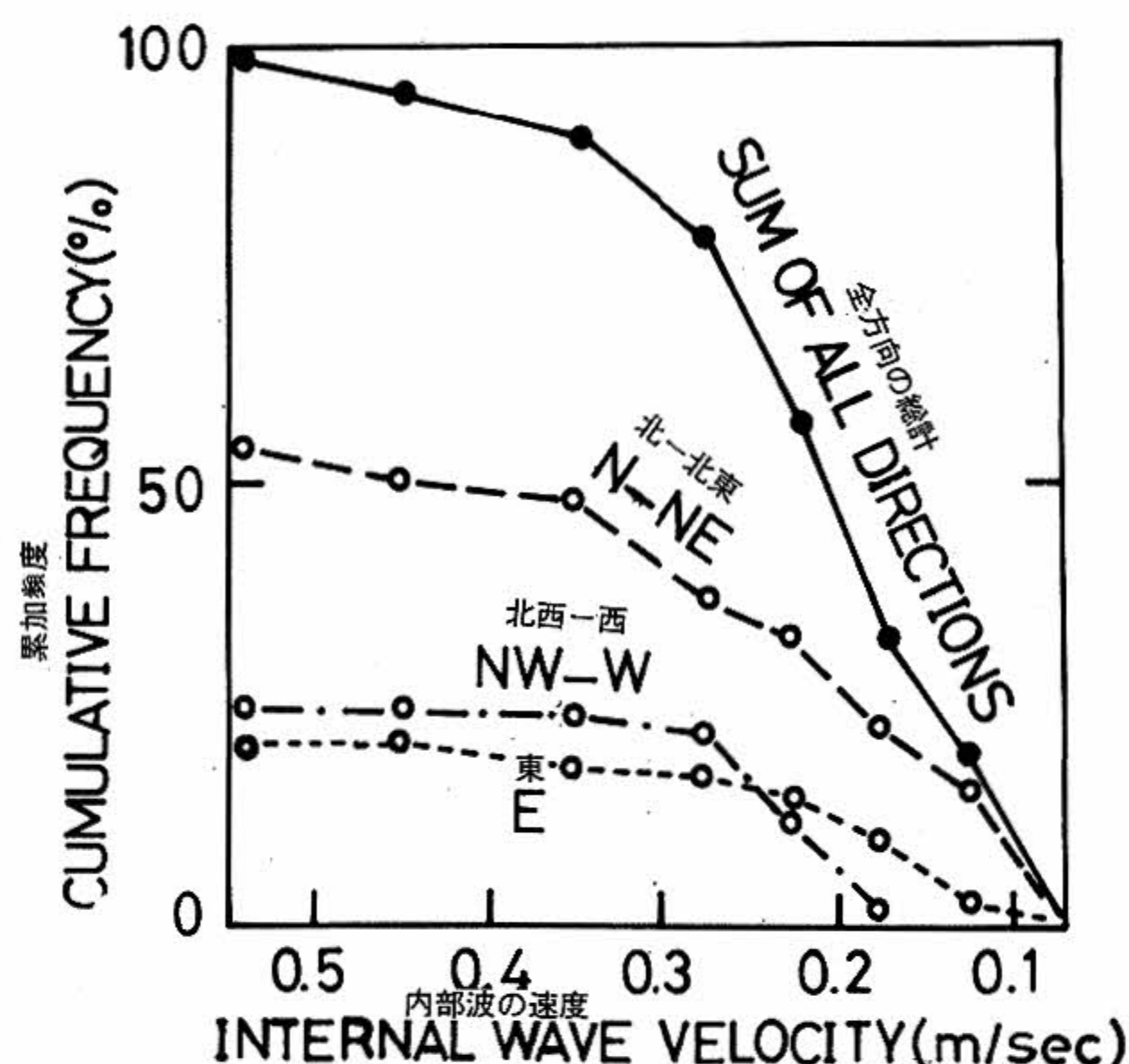


図 2 内部波速度の頻度分布

Occurrence frequency distributions of internal waves.

内部波の速さについては、0.15~0.25 m/sec が最も多く、全体の 38% をしめており、次いで 0.25~0.35 m/sec が 33% であった。

3. 内部波の速さの理論値との比較

観測によって求めた内部波の速さは理論式による計算値と比較を行った。理論式による計算は二重層モデルに限られるが、微小振幅理論から次式で表わされる。

$$C = \left[g \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで g は重力の加速度で、 h_1 と ρ_1 はそれぞれ上層の厚さとその密度、 h_2 と ρ_2 は下層の厚さとその密度である。理論値を求めるため、鉛直密度分布から上層及び下層の平均密度を算出した。上層及び下層の厚さは鉛直密度分布曲線の変曲点を境界として定めた。

図 3 は 3 点で得た水温変動の記録の例を示したものである。図は記録紙のコピーで、記録ペンの位置のずれは補正を行っていないものである。上部の図版は比較的長い周期の変動の例で、下部は最も頻繁に出現する内部安定性波によるものと考えられる。これらの短周期変動は数波現れては減衰して消滅している。それらの一連の波群は、その中央部で振幅

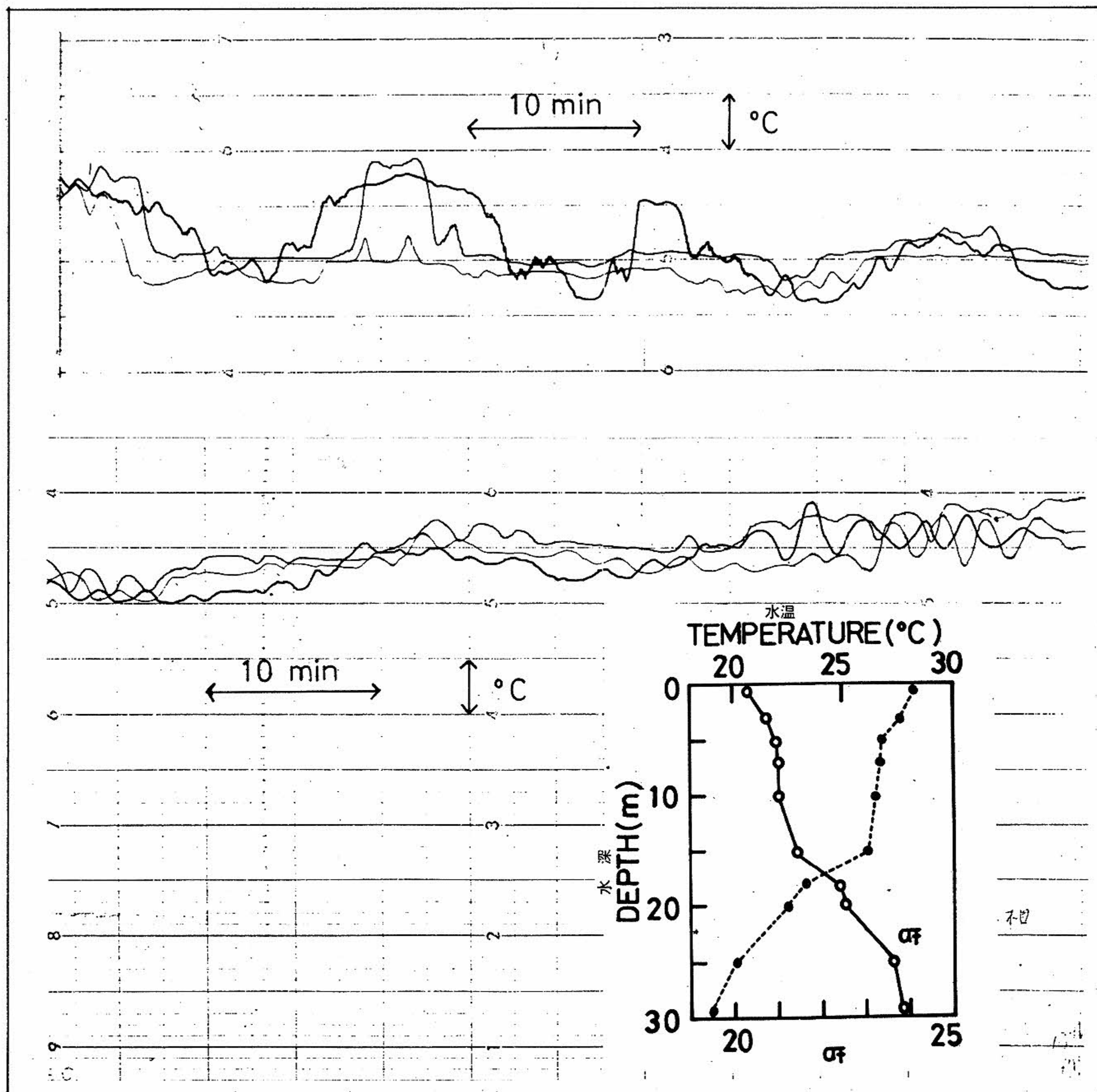


図3 3点における水温変動記録の例

が最大になっている。これは、ほぼ同じ方向に進む振幅のあまり変わらない複数の内部波が存在していて、それらが互いに干渉効果を起こすことによる現象でわないかと考えられる。これらのうなりの周期は20分前後を示している。さらに詳しくは後節の内部波の周期において論ずる。

同図中の水温並びに密度の鉛直分布は（点線が水温で、実線が σ_t ）、図に示された短周期変動とはほぼ同時刻（8月13日15:40）に得たものである。この密度構造から理論式によって計算で求めた内部波の伝ばの速さは0.28 m/secである。一方、観測によっ

Examples of three-station temperature recording and vertical structure in the afternoon (15:40) of Aug. 13. (The phases caused by the different position on the initial time is to be considered).

て得た水温変動の位相差から求めた速さの値は0.18 m/secとなり、理論値に比べてかなり小さい。表1に理論式から得た速さと水温変動の位相差から求めた値のいくつかを掲げて両者の比較を行なった。一般に理論式による速さの計算値の方が、観測値よりも大きい。二重層海洋においては、密度成層が安定である程、両者共に大きな値になることを示している。

Date		Thickness of layer		Average density		Density gradient of pycnocline $\sigma_t/m \times 10^3$	Theoretical wave speed m / sec	Observed wave speed m/sec (time)
Date	Time h:m	Surface m	Lower m	Surface g/cm ³	Lower g/cm ³			
I2 Aug.	9:20	I3	I7	I.0215	I.0240	0.41	0.42	0.27 (8:30) 0.23 (10:15)
I3 Aug.	8:15	I5	I5	I.0212	I.0235	0.20	0.41	0.30 (9:20)
I3 Aug.	15:40	21	9	I.0222	I.0235	0.21	0.28	0.18 (16:40) 0.19 (17:40)
I6 Aug.	15:00	I0	20	I.0220	I.0240	0.22	0.43	0.31 (15:30)
I8 Aug.	16:15	I5	I5	I.0220	I.0248	0.21	0.44	0.21 (14:00)

表1 内部波の速さの理論式による値と観測地との比較

1 Comparison between theoretical and observed wave speed.

4. 水平コヒーレンス

各点、すなわち A、B、C 点で 8 月 13 日に得た水温変動記録（図 3 に 1 部を示した）について解析を行なった。図 4 に水温の変動スペクトル、コヒーレンス、位相を掲げた。水平コヒーレンス及び位相は A、B 点に対するものである。スペクトル解析における自由度は約 40 で、コヒーレンスにおける水平の点線は 95% 信頼度限界を示す。3 本のスペクトルには 0.35 cpm 付近に峰をもち、おおよその似た形をしている。コヒーレンスは 0~0.5 cpm で高い値を示して

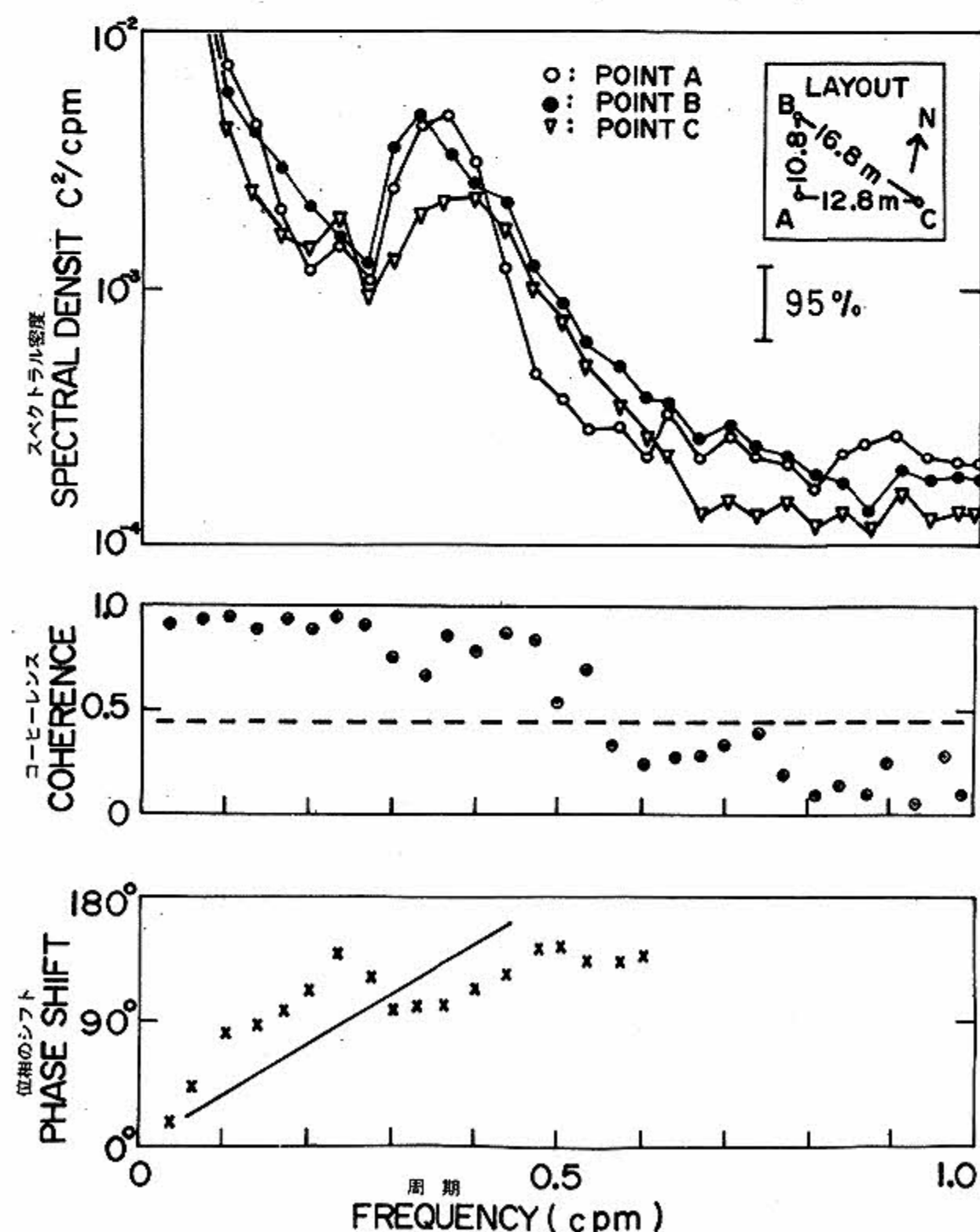


図4 水温変動スペクトルとコヒーレンス及び位相 (点A B間の)

Temperature spectra, horizontal coherence and phase.

おり、それよりの大きな振動数領域においては漸次減少している。位相は 0~0.25、0.35~0.50 cpm の狭い振動数領域内において、振動数の増加と共にほぼ単純に大きくなっている。このことは、ある限られた振動数領域内においては、内部波の伝ば速度があまり変化していないことを意味しているものと考えられる。なぜならば、位相を Ψ 、振動数を f とすると、 $c\Psi af$ 、であるからである。この関係についてもう少し検討を行う。

今、内部波が点 A、B を結ぶ線と θ の角度をもった方向に播ばする場合を想定する(図 5)。そうすると点 AB 間で生ずる位相は次式で表わせる。

$$\Psi = 2\pi \frac{fL \cos \theta}{C} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 C は内部波の速さで L は点 AB 間の距離である。記録紙上の個々の変動の峰間の位相差から求めた内部波の速さの平均は 0.18 m/sec であり、方向はほぼ A から B に向かっているので $\theta \approx 0$ とする。また、 $L = 10.8$ m として、これらの値を (2) 式に代入すれば Ψ の値は f の 1 次関係として得られる。第 4 図の位相の図版中の直線はそれを示したものである。

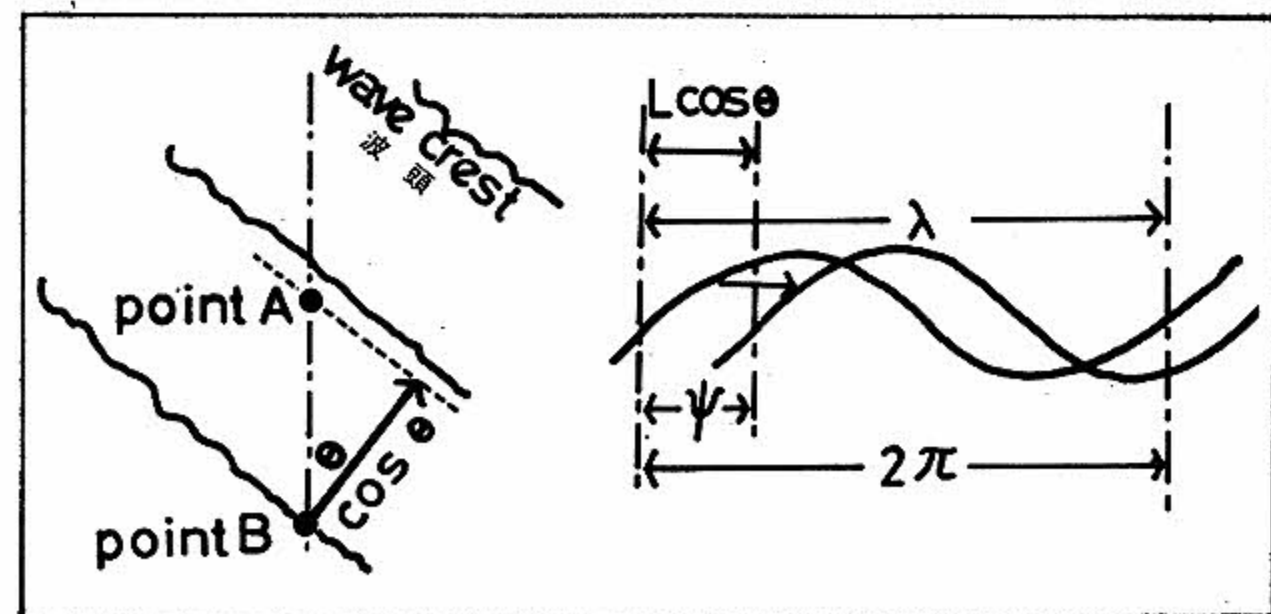


図5 内部波の伝ばと位相との関係の図解

Fig. 5. Schematic presentation of the relationships between phase and incidence of internal waves.

5. 内部波の周期

観測を行なった水温変動の周期には、長いものは内部潮汐と4.2時間程の内部セイシュ（港内の水の固有振動）と考えられるものがある。短いものには図3に示したような、上部の10数分間期、それに下部の例にみられるような2～3分周期のものなどがある。

海岸を歩いていると、ときどき波高の大きな碎波があることに気づく。これは周期の少し異なる複数の波が重なり合って生じた一種の共振（ビート現象）と考えられる。海岸に生ずるビートには2～3分周期のサーフビートと呼ばれる、よく知られた現象もある。内部波においても、第3図の下部の例にみられるようなビート現象が生ずるものと考えられる。本観測においては、この例にみられるような、20分前後のうなりの周期をもつビートがしばしば出現した。図6にビートが頻繁に現れている水温変動のスペクトルの一例を示した。スペクトル密度の山は5.20分、3.46分と2.49分の周期にある。

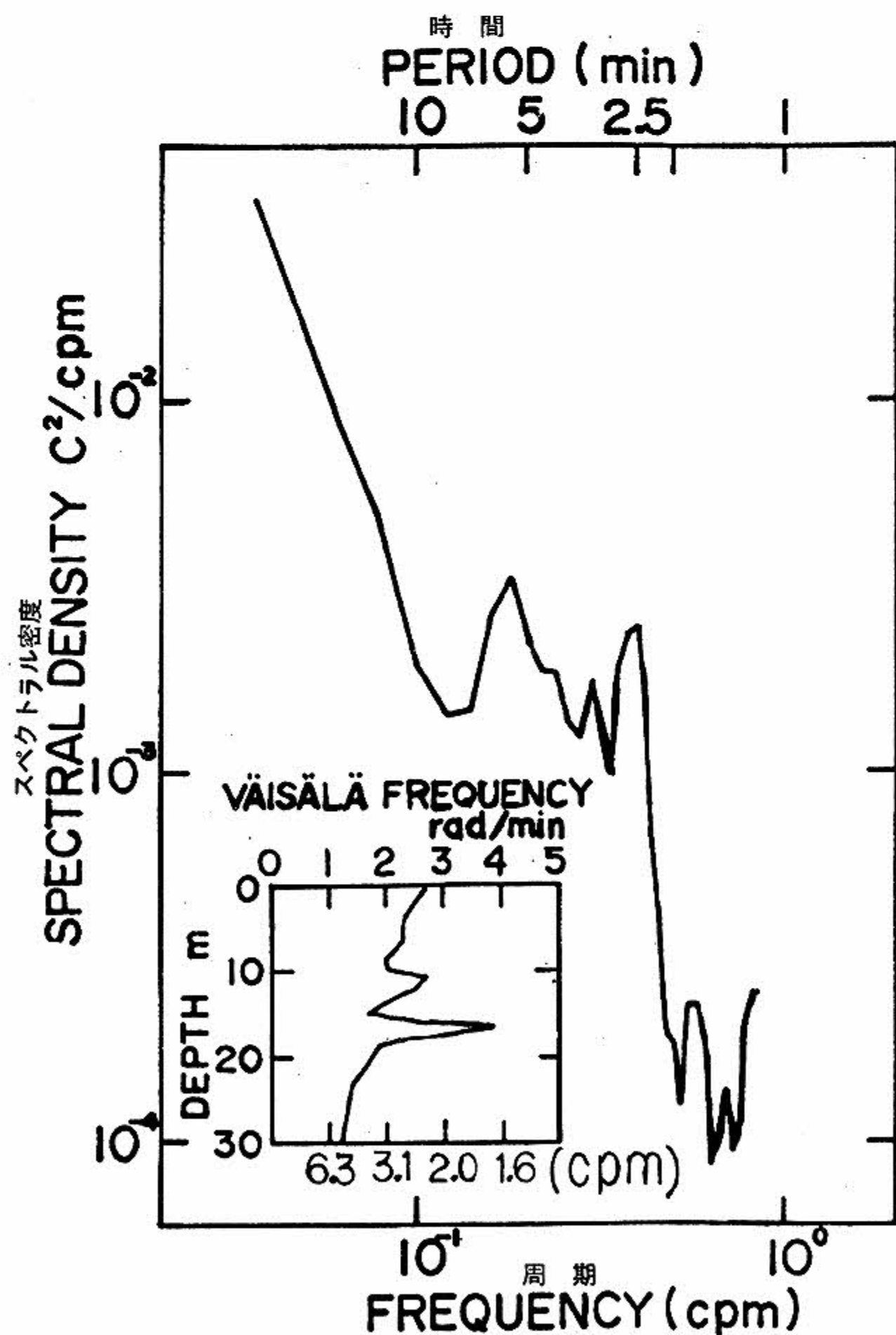


図6 短周期水温変動スペクトルの例
(1972年8月18日 1430～1730の記録から)

Energy spectral density for the temperature fluctuations recorded from 14:30 to 17:30, August 18, 1972.

τ_1 、 τ_2 の周期をもつ2つの波が、ほぼ同じ方向に進む場合のビート現象を考える。簡単化のため2つの波の振幅は同じとして、また T_1 、 T_2 を合成されたみかけ上の周期とすると次の関係式がなりたつ。

$$2A \cdot \sin \frac{2\pi}{T_1} t \cdot \cos \frac{2\pi}{T_2} t \\ = A \cdot \sin \frac{2\pi}{T_1} t + A \cdot \sin \frac{2\pi}{T_2} t \dots\dots\dots (3)$$

ここで $T_1 = \frac{2\tau_1\tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$ 、 $T_2 = \frac{2\tau_1\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}$ である。

図6のスペクトルの山から τ_1 、 τ_2 の周期を選んで、上の関係を用いて T_1 、 T_2 を求めると第2表の如くなる。

2つの T_2 の値 (20.68ならびに 17.6) から、記 録に現われる 20		τ_1	τ_2	T_1	T_2
		5.20	3.46	4.20	20.68
		2.49	3.46	2.89	17.76

表2 ビート現象による見かけの周期と成分の周期

2 Periods obtained as peaks in the spectral density (τ_1 , τ_2) and resultant periods by calculation (T_1 , T_2).

分前後のうなりの周期が理解できる。しかしながら第6図中のバイサラ振動数（水の安定度で表まる内部波の振動数）から、海域は多重構造をなしているようなので、実際はもっと複雑な現象なのかもしれない。

6. 結 論

駿河湾の東沿岸、田子港内において内部波の伝播速度の観測を行った。大部分の内部波は岸に向かって伝播している。しかし約15%程が港奥から港口方面へ向かっているものがある。これは内部波が碎波帯付近で発生したものと推測される。

得られた内部波の速さは0.1～0.4 m/secの範囲になっているが、0.15～0.25 m/secの値に収束している。これらの速さの値は微小波振幅の理論式を用いた計算値に比べて一般に小さい。これらの原因としては下記のようなことが考えられる。浅海においても、密度躍層がソフトになると、速さの遅い多モードの内部波が発生し易いこと(DARIS et al., 1967)、もう一つは、密度躍層面が水平でなく、波動が斜面を伝播することなどがあげられる。

3点における水温変動の波頂の位相を読みとることにより、内部波の速度を求めたが、これらの値は統計的計算による水平コヒーレンス並びに位相を用いて検討を行なった。その結果、両者の振動数に対する2点間の位相差は、同様な傾向にあることが示

された。

水平コヒーレンスは0.4 cpm 付近から急に小さくなっている。高い振動数領域におけるコヒーレンスの値が急に減衰することは、多方面から入射する内部波の干渉効果等がその一因ではないかと考えられる。干渉の例については第5節においても述べてある。それに海域の密度構造やモードの変化による内部波の速度の変化も、高い振動数領域におけるコヒーレンスの減衰の原因となるものと考えられる。

参 照 文 献

- 1) DAVIS, R. E. and A. ACRIVOS: The stability of oscillatory internal waves. J. Fluid Mech., 30(4), P.723. (1969)
- 2) GAUL, R. D.: Observations of internal waves near Hudson Canyon. J. Geophys. Res. 66(11),

P.3821-3830. (1961)

- 3) KEULEGAN, G. H.: Characteristics of internal solitary waves. Jour. Res. Nat. Bur. Stand. 51, P.133-140. (1953)
- 4) LONG, R. R.: Solitary waves in the one-and-two-fluid system. Tellus, 8, P.460-461. (1956)
- 5) MIDORIKAWA, K.: On Internal Waves in Suruga Bay, I Observation of Internal Waves. Bull. Coastal Oceanogra., 10(2), P.101-104. (1973)
- 6) MIDORIKAWA, K.: ON INTERNAL WAVES IN SURUGA BAY, Internal wave motion and marine sediments. Preprint of The 3rd International Ocean Development Conference. Tokyo, 1975-08, Vol 5. P.11-20