

大熊海岸における砕波帯内外の流れの特性について

中村 義治*・堀川 清司**・佐々木民雄***・藤 縄 幸雄****

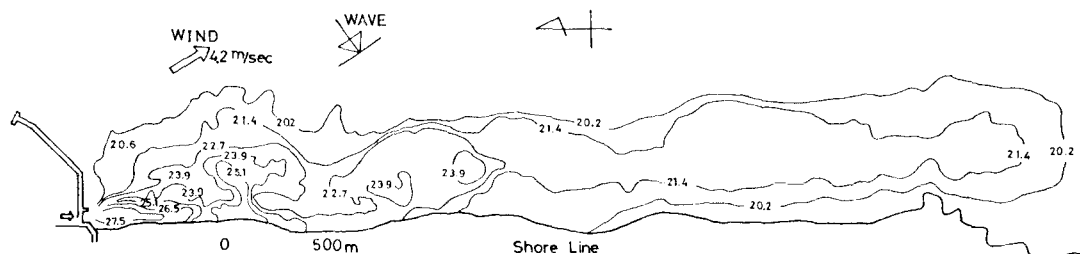
1. ま え が き

大熊海岸にある原子力発電所から、現在毎秒 200 トンの温水が放出されている。この量は同発電所の最大放水流量に近い状態である。

この温水は汀線に近い放水口から岸に平行に放出されており、そのマクロな拡散分布は岸に沿って長く延びたパターンをしている場合が多い¹⁾。これまでの温水拡散調査の結果からマクロな拡散分布の形成には砕波帯外の海岸流²⁾の流況が強く働いており、他の因子（波、風、

潮位等）は二次的な働きをしていることが判ってきた。この傾向は排水量が大きくなる程強くなっている。

しかし、観測された温水拡散の分布には図—1 にみられるようなパッチ状の部分や岸から沖へ突き出ている部分等があり、放水口から同心楕円状には拡がっておらず、その内部構造は複雑である³⁾。本研究は温水拡散のマクロな分布とミクロな内部構造の形成にそれぞれ重要な働きをする砕波帯外の海岸流と砕波帯内の海浜流の特性について、1978 年 3 月と 4 月に大熊海岸で行われた現地観測の結果から考察したものである。

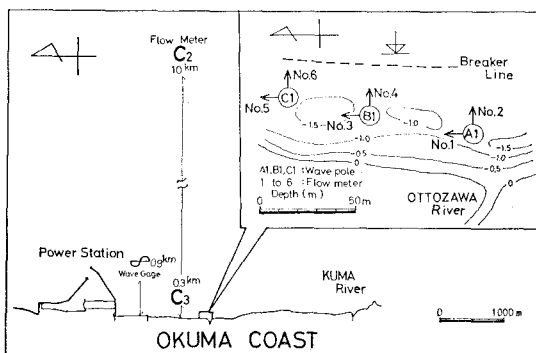


図—1 温水の拡散パターン

2. 沖合海岸流観測とその結果

観測の概況：発電所南放水口から南に 1 km の地点から沖合に 10 km (C_2) と 300 m (C_3) の地点にアンデラ型流速計を設置し（図—2 参照）、流向、流速、水温、塩分の長期観測を実施した。 C_2 は 3 月 6 日から 4 月 9 日までの約 1 カ月間、 C_3 は途中流失したため 3 月 17 日、18 日の 2 日間について観測した。 C_2 と C_3 のデータのサンプリング間隔はそれぞれ 10 分と 1 分である。流速計の設置水深は C_2 が海面下 -20 m、 C_3 は -2 m で共に全水深の半分である。

解析結果：図—3 より C_2 の各流速成分には、波動的な交番現象がみられる。東流成分は観測後期に 1 日程度



図—2 観測地点図

の短周期変動がみられるが全体的には、北流成分に似た変動をしており位相の遅れがみられる。また、 C_2 における流れの各成分の平均値と標準偏差は北流成分が $\bar{v} = -4.4$ cm/sec、 $\sigma_v = 13.3$ cm/sec で東流成分が $\bar{u} = -3.6$ cm/sec、 $\sigma_u = 6.9$ cm/sec である。観測期間中 C_2 の流れは南西に向っており、この傾向は図—4 の進行ベクトル

* 正会員 水産修 福島県水産試験場 漁場環境部
 ** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 海岸環境工学研究センター研究員
 **** 理博 国立防災センター 沿岸防災第 1 研究室長
 注) ここで海岸流とは Coastal Current の意味で海洋学では沿岸流と称している。

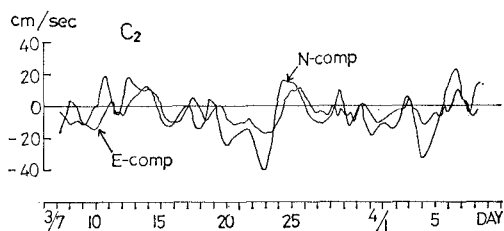


図-3(a) C2 の各流速曲線
(25 時間の移動平均)

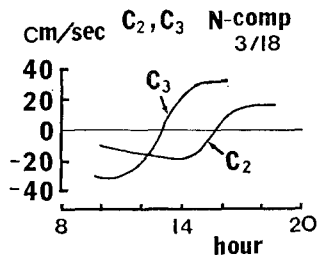


図-3(b) C2 と C3 の北流成分
(1 時間の移動平均)

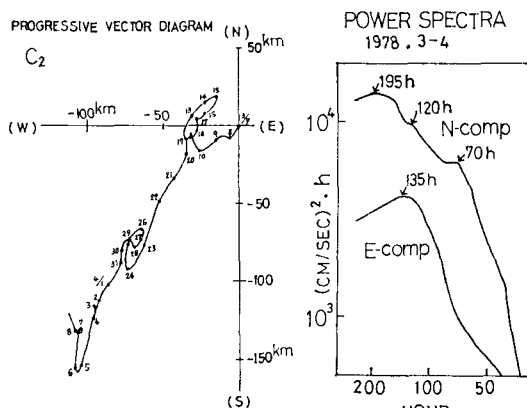


図-4 C2 の進行ベクトル

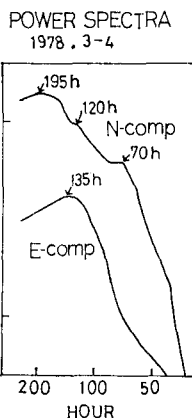


図-5 各流速成分のパワースペクトル密度
(C2)

図にははっきりみることができる。同ベクトル図には南西の平均流に乗った時計廻りの大きなループが2回みられ、過去に同海域で実施された海岸流観測³⁾や Oregon 沖の CUE (Coastal Upwelling Experiment)⁴⁾にも同様な時計廻りの転流が報告されている。一方、3月18日の C3 の北流成分は C2 より大きい流速 (約 30 cm/sec) を示しており、転流の時期も C2 より3時間程早い。C2 とよく似た流況であり、岸から 300 m の地点においても沖合海岸流の影響がはっきり現われている。

図-5 は C2 の流速成分のデータを 25 時間の移動平均した後、MEM (Maximum Entropy Method) で計算したパワースペクトル密度である。北流成分には、パワーレベルの高い平坦なピークを持つ3つの長周期変動 (195, 120, 70 時間) と図には現われない高周波領域

(1 日以下) でシャープなピークを持つ2つの短周期変動 (19, 15 時間) が存在している。また、東流成分には 135 時間に比較的是っきりしたピークが現われており、1 日以下の高周波領域では北流成分と同じ周期にスペクトルのピークが存在している。このうち 19 時間の成分は大熊海域の慣性振動の周期⁵⁾である。また、北流成分の 70 時間のピークは 1976 年に行なった同海域の海岸流調査³⁾の際にも第2モードの陸棚波として検出された周期成分である。しかし東流成分には、70 時間と 195 時間のピークは現われておらず、東流成分の 135 時間のピークに対応する北流成分として、120 時間に弱いピークが存在しているだけである。この約 130 時間の波を陸棚波と推定するためには、今回のような1点観測だけでは不十分である。しかし、C2 の地点で北流成分の振幅が東流成分より大きい ($\sigma_v/\sigma_u=1.9$) ことや、平均流にくらべて流れの振幅が大きい ($\sigma_v/\bar{v}=3.0$, $\sigma_u/\bar{u}=1.9$) 点、更には転流の方向が時計廻りをしており、北流成分に対して東流成分の位相が遅れていること等は陸棚波の理論的性質と定性的に合っている。

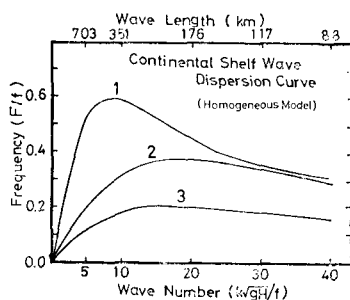


図-6 陸棚波の分散関係
注) 縦軸は慣性振動数 f で横軸はロスビーの変形半径 $\sqrt{gH}/f$ の逆数で正規化している。
(f : コリオリパラメータ H : 水深)
(F : 周波数 K : 波数)

大熊海岸の陸棚地形に合わせて数値計算により求めた陸棚波の分散曲線⁵⁾が図-6である。同図より、大熊海岸における陸棚波として $F/f=0.58$ (34 時間) より低周波成分の波だけが存在することになる。また、130 時間の長周期成分が陸棚波であると推定した場合、図-6 の分散曲線より第1モードから第3モードまでのモード波が存在可能である。しかし、陸棚スケール (約 240 km) から考えて、非常に岸に近い C2 点で北流成分のスペクトル (P_v) と東流成分のスペクトル (P_u) の比があまり大きくない ($\sqrt{P_v/P_u}=1.62$) ことを考えると、第1モードより第2、第3モード波の可能性が強い。特に第3モードの場合、分散関係式からその波長は約 430 km になり、1976 年に行なった海岸流調査の際に検出された第2モードの陸棚波の波長とオーダ的に一致している。

注) inertia period = $2\pi/f$ f : コリオリパラメータ

表—1 観 測 諸 元

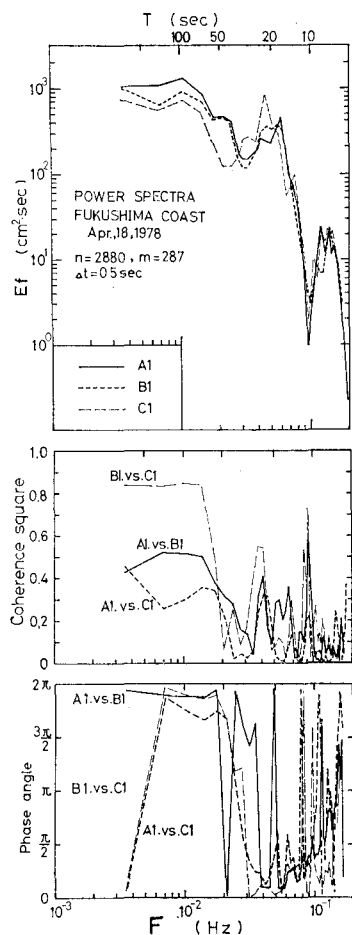
観測 年月日	時刻	観測 項目	測定間隔 ΔT (sec)	天候	風 向 風速 (m/sec)	波の 状態	沖 波		砕波波高 (m)	砕波帯幅 (m)	潮位
							$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)			
1978 4.18	13:30 16:00	波高 流速	0.5	晴	NNE 1.5	うねり	0.73	9.1	0.80	50	中潮

3. 砕波帯内部の流動および波高の観測とその結果

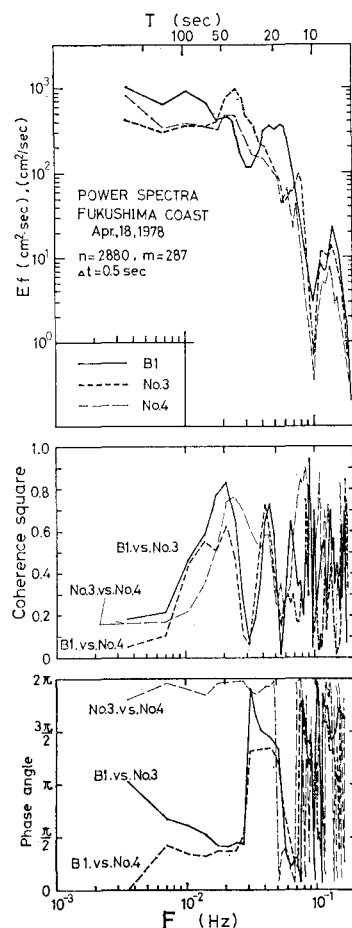
観測の概況：図—2 に示した地点で砕波帯内部の流れと波高の観測を実施した。観測は4回(3月12日に2回, 4月18日, 19日に1回ずつ)行われ, 今回はそのうち比較的長時間安定して観測できた4月18日のデータについて解析した。流速は2方向電磁流速計を沿岸方向に3台配列し, 波高は流速計の設置地点に測量用のポールを立てて, 16mm メモ・モーション・カメラで撮映する方法で計測した。流速, 波高は同期させながら0.5秒間隔でサンプリングした。また, 沖波波高は図—2 に示した地点(離岸900m, 水深10m)で東京電力(株)所

有の水圧式波高計の記録から抽出し, その一部を使用した。調査の諸元は表—1 の通りである。観測された波高, 流速とも約24分間の記録を0.5秒間隔で読み取り10秒の移動平均後にスペクトル解析した。

解析結果：図—7 は沿岸方向に約50mの間隔で設置した3地点の波高記録(A1, B1, C1)のスペクトルと位相関係及びコヒーレンスを示したものである。各スペクトルには96秒と47秒の比較的安定したピークと22秒, 17秒, 9秒付近にもピークがみられる。このピーク周波数の位相関係とコヒーレンスは表—2の通りである。96秒と22秒に相当する波は比較的高いコヒーレンス値を示し, 各位相差は同位相に近い。この時の沖波の包絡線のスペクトルには100秒と22秒と10秒に



図—7 波高のクロススペクトル



図—8 波高と流れのクロススペクトル

表—2 波高のスペクトルピークの位相差とコヒーレンス

ピークの周期 (sec)	A1 vs. B1		A1 vs. C1		B1 vs. C1	
	位相差	コヒー レンス	位相差	コヒー レンス	位相差	コヒー レンス
96	-0.3	0.5	-0.8	0.3	-0.3	0.8
47	0.03	0.3	**	**	**	**
22	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.5
17	0.3	0.3	**	**	**	**

* 位相差の単位はラジアン

** C1 にピークが存在しない

ピークがあり、96 秒と 22 秒の波は Longuet-Higgins の理論⁶⁾ から予想されるように入射波浪に伴う radiation stress が起因した沖から岸に向うサーフ・ビートの性格を持っているように思われる。また、9 秒の波はこの時の沖波の有義波周期にほぼ一致しており、沖からの入射波の影響を直接受けていることが考えられる。

図—8 は配列の中央に位置する波高 (B1) と沿岸流速 (No. 3) 及び岸沖流速 (No. 4) の各スペクトルと位相関係並びにコヒーレンスを示したものである。各スペクトルにはいくつかのピークがみられ、そのうち 96 秒と 47 秒のピークはどの系列にも現われている。また、A1 と No. 1 及び No. 2 の系列には 47 秒のピークだけが安定して現われており、今後この 47 秒の周期成分に焦点を当てその特性について考察する。

海底地形が指数型 (式 (1)) で表わされる場合、Ball⁷⁾ によって求められた edge wave の分散関係式 (式 (2)) を大熊海岸にあてはめたのが 図—9 である。

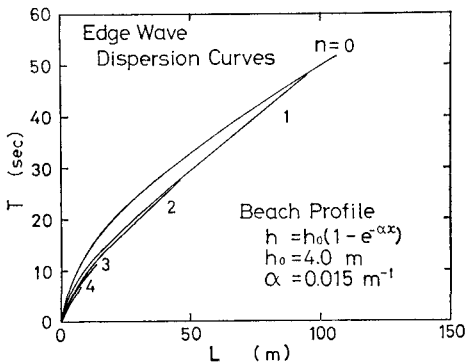
$$h(x)=h_0(1-e^{-\alpha x}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで $h(x)$: 沖方向 x 地点での水深。

$$h_0=4\text{ m}, \alpha=0.015 \text{ (大熊海岸)}$$

$$\frac{\omega^2}{g\alpha h_0}=\frac{1}{2}\{(2n+1)(\alpha^2+4k^2)^{1/2}-\alpha(2n^2+2n+1)\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで ω : 角周波数, k : 波数, n : モード数



図—9 Edge Wave の分散関係

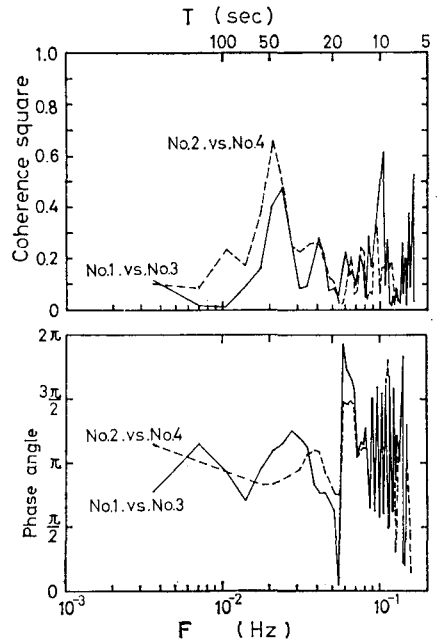
また、Ball⁷⁾ の理論から edge wave の trapping condition として定義されている各モードの cut-off 周波数 F_0 は、式 (3) で与えられる。大熊海岸の各モードの cut-off 周波数を 表—3 に示した。

$$F_0=\frac{\alpha\sqrt{gh_0}}{2\pi}\sqrt{n(n+1)} \dots\dots\dots (3)$$

表—3 から 47 秒の波は第 1 モードの cut-off 周波数に相当しており、式 (2) の分散関係式からはこの波の波長が 90 m になることがわかる。

表—3 大熊海岸における各モードの cut-off 周波数

n	T	周 期 (sec)
1		47.2
2		27.3
3		19.3
4		14.9



図—10 流れの位相差とコヒーレンス

次に 図—10 から 47 秒周期における各測点の流れの位相関係とコヒーレンスをみると、沿岸流速の No. 1 と No. 3 の場合は位相差が -2.8 rad でコヒーレンスは 0.4 である。そして岸沖流速の No. 2 と No. 4 の場合は位相差が 2.6 rad でコヒーレンスは 0.7 である。コヒーレンスは比較的高い値を示しており、位相関係は共に逆位相である。

図—8 より 47 秒周期の波高と流れの位相関係、並びにコヒーレンスを検討すると次のようになる。この周期

における波と流れ、及び流れどうしのコヒーレンスは共に高い値(約 0.7)を示しており、位相関係は B1 と No. 3 が 1.3 rad, B1 と No. 4 が 1.2 rad そして No. 3 と No. 4 が -0.3 rad である。これを理論的に求めた edge wave の位相関係⁸⁾(表—4 参照)から考察すると standing edge wave の位相関係に近いことがわかる。また、A1 と No. 1 及び No. 2 の位相関係からも同様な結果が与えられた。

表—4 Edge Wave の位相関係

Type	u . vs. v	η . vs. u	η . vs. v
Standing Wave	$0, \pi$	$\pi/2, 3\pi/2$	$\pi/2, 3\pi/2$
Progressive Wave	$\pi/2, 3\pi/2$	$\pi/2, 3\pi/2$	$0, \pi$

(u : 岸沖流速, v : 沿岸流速, η : 波高)

これまでの考察で、47 秒の波を edge wave とみてその特性について検討してきたが、表—2 にみられるように C1 の波高スペクトルには 47 秒のピークはみられず、A1 と B1 の間のコヒーレンスも低く、位相関係も流れから予想される edge wave のものと矛盾している。しかし、波高と流れのデータを相互的に検討すると、47 秒の波は standing type の low-mode edge wave の可能性が強い。また、大熊海岸に似た緩勾配傾斜を持つ阿字ヶ浦海岸で、佐々木⁹⁾らによって観測された波高の長周期変動にも 100 秒と 50 秒に安定したスペクトルピークが現われており、この波も standing type の low-mode edge wave (外重力波)と考えられている。一方、Huntley¹⁰⁾は、現地観測からスペクトルピークが各モードの cut-off 周波数に相当していることを指摘しており、このことから推察すると 47 秒の波は第 1 モードに相当することになる。更に、式 (2) の分散関係式から計算された 47 秒周期における第 1 モードの edge wave の波長は 90 m になる。

4. おわりに

温水の拡散方向と海岸流の流向とは、かなり相関の高いことが過去の赤外線スキニングと流動調査から確認されている。つまり、温水が北に拡散する割合と南に拡散する割合の比率が海岸流の転流周期に依存していることになる。そして、最近の研究^{9), 11)}からこの海岸流の長周期変動が、メソ・スケールの渦モードの波(陸棚波)であることが判ってきており、周期にして 3 日以上、波長にして数百キロ・メートルの時空間スケールを持った波動現象として、沖合の流動を考える必要がある。

一方、このような海岸流が陸地の影響をうけて沿岸境界層⁹⁾を作り、境界層内部では沿岸方向の流れが岸沖方向より卓越した異方的な流速場を形成している。流れの異方性は図—1 にみられる偏平な拡散分布をつくる原因の一つとして考えられる。また、砕波帯内部の流動現象の中で特に離岸流の強さとその発生間隔は、拡散分布の複雑な内部構造を決定している重要な要素である。

今後は砕波帯付近における海岸流と海浜流の相互作用、並びにこれらの流れが温水拡散に与える非定常な影響について、より定量的な議論を展開してゆく必要がある。

終りに、今回の観測に参加協力して頂いた東京大学理学部永田豊助教授に対して深謝致します。また、東京電力(株)福島第 1 原子力発電所からは、データの一部を提供して頂いた。データ処理については、特に(株)I.N.A. 新土木研究所の神田康嗣氏に協力をお願いした。以上の諸氏に対して深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 中村義治・堀川清司: 開放性海域に放出される温水の拡散について, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 462~466, 1977.
- 2) 堀川清司・林 銘崇・水口 優: 砕波帯内に放流された温水の挙動について, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 457~461, 1977.
- 3) 中村義治: 福島県沿岸の流況解析—III, 福島県水産試験場研究資料 No. 141, 1977.
- 4) Kundu, P. K. and J. S. Allen: Some three-dimensional characteristics of low-frequency current fluctuations near the Oregon coast, J. Phys. Oceanogr., Vol. 6, pp. 181~199, 1976.
- 5) 中村義治・中田喜三郎・久保田雅久: 沿岸における陸棚波, 未発表, 1978.
- 6) Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart: Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications, Deep Sea Res., Vol. 11, pp. 529~562, 1964.
- 7) Ball, F. K.: Edge waves in an ocean of finite depth, Deep Sea Res., Vol. 14, pp. 79~88, 1967.
- 8) 藤縄幸雄・岡田憲司・渡部 勲: 波浪に伴う長周期波(サーフ・ビート)の特性(II), 国立防災科学技術センター研究報告, 第 17 号, pp. 111~166, 1977.
- 9) 佐々木民雄・堀川清司・久保田進: 海浜流に関する研究(第 5 報), 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 586~590, 1977.
- 10) Huntley, D. A.: Long-period waves on a natural beach, Jour. Geophys. Res., Vol. 81, pp. 6441~6449, 1976.