

港内における方向スペクトルの観測と反射率の推定

大下 哲 則* ・ 近 藤 浩 右**・ 関 本 恒 浩*
今 井 澄 雄***・ 中 村 光 宏****

1. ま え が き

周波数分散性および方向分散性を有する現地不規則波浪の特性を記述する方向スペクトルに関する情報は、今後ますます重要性を増し、港湾構造物の合理的な設計を行う際に不可欠の要素となるものと推測される。近年の方向スペクトル推定理論の発達に伴い^{1),2)}、方向スペクトルの屈折・回折変形に関する現地調査が実施されるようになり、研究成果が報告されている^{3),4)}。また、方向スペクトルは単に不規則波の特性を記述するのみではなく、構造物前面の入・反射波共存場においてそれを推定することにより、入・反射波のエネルギーを分離し、反射率を推定することも可能である^{5),6)}。

本研究においては、複雑な防波堤形状を有する港湾を対象として波高計と流速計の組合せを用いた波浪観測を行い、EMLM¹⁾を適用し、港内外の方向スペクトルを推定する。その結果から、方向スペクトルの変化に及ぼす回折の効果を明らかにする。さらに、EMLMを入・反射波共存場に拡張した式より、防波堤前面の方向スペクトルを求め、反射率を推定する。

2. 現 地 調 査

2.1 調査地点および調査期間

現地調査は、図-1に示す新潟県柏崎市にある柏崎・刈羽原子力発電所専用港湾（東京電力株式会社）におい

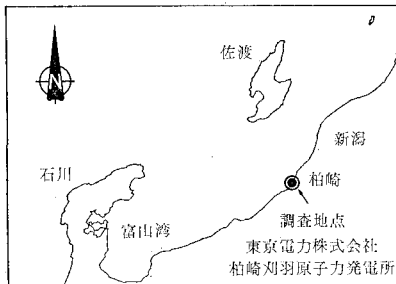


図-1 調査地点

て、冬期波浪を対象とし、昭和61年1月16日～30日および2月11日～27日の2回にわたり実施した。当地点は、北に佐渡ヶ島、西に能登半島があり、低気圧の通過に伴う高波浪の来襲方向は、NW～W方向にほぼ限定される。

2.2 調査方法

波浪観測では、あらかじめ陸上で同期させた自記式の超音波式波高計と電磁流速計（コンパス内蔵型）を同一の架台（約1×2m）に取り付け、これを海底に設置して同一地点における水面変動と水平2成分水粒子速度の同時記録を計測した。計器の設置位置は、図-2に示す●印の地点で、1回目の1月16日～30日にかけてはP₀、P₁、P₂の3地点、2回目の2月11日～27日にかけてはP₀、P₁、P₃、P₄の4地点で観測を実施した。反射波の共存する南防波堤背後のP₂地点については、方向スペクトルおよび反射率の推定精度を確保するため、あらかじめ数値シミュレーションを行い、構造物からの距離を定めた。

データの取得は、2時間毎の約10分間とし、0.5秒のサンプリング・インターバルで各回1022データのサンプリングを行った。

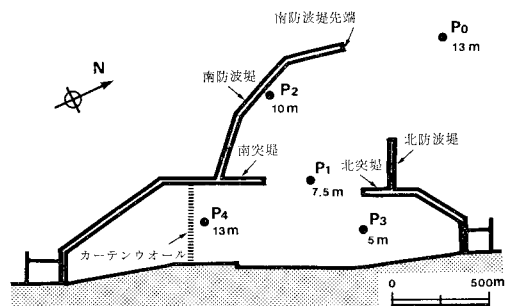


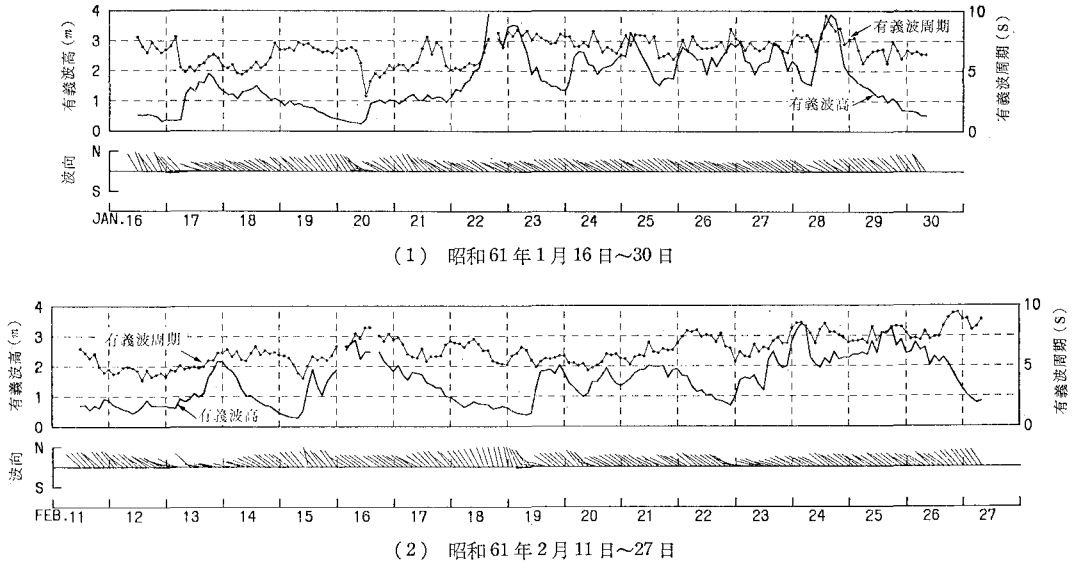
図-2 港湾形状および計器の設置位置

3. 調査結果と考察

3.1 データ処理の方法

超音波式波高計および電磁流速計により得られた波形記録には、時々スパイク状のノイズが含まれていたため、グラフィック・ディスプレイの画面状で波形を確認

* 正会員 工修 五洋建設株式会社土木設計部
** 正会員 工修 五洋建設株式会社技術部技術企画課
*** 東京電力株式会社原子力建設部
**** 工修 東電設計株式会社原子力土木設計部

図-3 調査期間中の波浪条件 (P₀ 地点: 港口部, 水深約 13 m)

しつつ、前後のデータからの線形補間により修正を行った。

スペクトル解析に当っては、まず、データを平均値まわりの変動に補正し、リニアトレンドを除去した後、データ・ウィンドーを用いて端部のデータの修正を行い、時系列データを作成した。つぎに、0 データ 2 個を末尾に追加してデータ数を 1024 とし、FFT 法によりパワースペクトルを求め、Hanning Window を 20 回かけてスペクトルの平滑化を行った。

また、EMLM¹⁾による方向スペクトル解析では、各測定時刻毎に超音波式波高計の水位記録より実水深を算定するとともに、水平 2 成分水粒子速度のパワースペクトルの和と水位変動のパワースペクトルの比あるいは微小振幅波理論より、各回の応答関係を求め、解析に用いた。

方向スペクトル解析において、P₀ あるいは P₁ 地点のように反射波の影響の小さな地点には EMLM を用いたが、P₂ 地点のように入・反射波共存場の計測結果に対しては、MLM と MMLM の関係²⁾と同様の取扱いにより入・反射波の位相関係を考慮し、EMLM の式から方向スペクトルおよび反射率の推定式として式 (1) および (2) を導き、解析に用いた。式中、 $\hat{S}(\mathbf{k}, \sigma)$ は推定方向スペクトル、 $\mathbf{x}$ は平面 2 次元の座標ベクトル、 $\mathbf{k}$ は波数ベクトル、 σ は角周波数、 Φ はクロススペクトル行

列、 $H(\mathbf{k}, \sigma)$ は応答関係を表し、* は共役、添字 r は反射面に対して鏡像であることを示している。

また、反射率の推定方法としては、式 (2) で求める以外に式 (1) で推定した方向スペクトルより入射波のエネルギーと反射波のエネルギーを分離し、その比として求める方法もある。後述する推定反射率は、この方法により求めた。

3.2 調査期間中の波浪条件

図-3 に、調査期間中の波浪条件として、P₀ 地点 (港口部) の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ および主波向の経時変化を示す。

図中、1/22 や 2/16 のように高波浪時に欠測が生じているが、これは超音波式波高計のデータの欠測によるものである。この原因としては、砕波により水面付近に多量の気泡が発生し、超音波の伝播に支障を来したり、最大波高が設置水深 (約 13 m) の 1/2 以上となったためと考えられる³⁾が明らかなことはわからない。

調査期間内の波浪条件としては、 $H_{1/3}$ が 1 m 以下の静穏な日は非常に稀れで、高波浪の来襲頻度が高く、1/22 から 1/28 にかけては約 1 週間も $H_{1/3}$ が 2 m 前後の波浪が続いている。この高波浪に対応した $T_{1/3}$ は、概ね 6 ~ 8 秒程度と風波性が強い。また、波高の増加に伴って波向が W から N 方向へと変化している時化が

$$\hat{S}(\mathbf{k}, \sigma) = \alpha \left[\sum_{m,n} \Phi_{mn}^{-1} \cdot \{ H_m^*(\mathbf{k}, \sigma) \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{x}_m) + r H_m^*(\mathbf{k}_r, \sigma) \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{x}_{nr}) \} \right. \\ \left. \times \{ H_n(\mathbf{k}, \sigma) \exp(i\mathbf{k}\mathbf{x}_n) + r H_n(\mathbf{k}_r, \sigma) \exp(i\mathbf{k}\mathbf{x}_{nr}) \} \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$r = - \frac{\sum_{m,n} \Phi_{mn}^{-1} [H_m^*(\mathbf{k}, \sigma) \cdot H_n(\mathbf{k}_r, \sigma) \cdot \exp \{ i\mathbf{k}(\mathbf{x}_{nr} - \mathbf{x}_m) \} + H_m^*(\mathbf{k}_r, \sigma) \cdot H_n(\mathbf{k}, \sigma) \cdot \exp \{ i\mathbf{k}(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_{mr}) \}]}{2 \sum_{m,n} \Phi_{mn}^{-1} H_m^*(\mathbf{k}_r, \sigma) \cdot H_n(\mathbf{k}_r, \sigma) \cdot \exp \{ i\mathbf{k}(\mathbf{x}_{nr} - \mathbf{x}_{mr}) \}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

多く、当地点の冬期の高波浪は、日本海を通過する低気圧によるものが支配的であることがわかる。

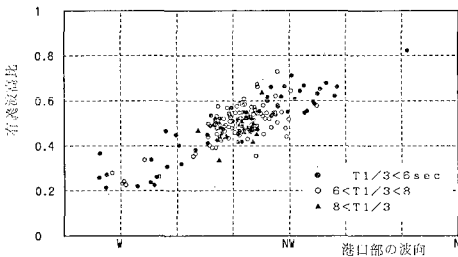
3.3 港内の波浪特性

港内の波浪観測地点のうち、南北突堤間 (P_1 地点) と北突堤背後 (P_3 地点) の波浪特性に関して、港口部 (P_0 地点) の波浪との対応で以下に示す。

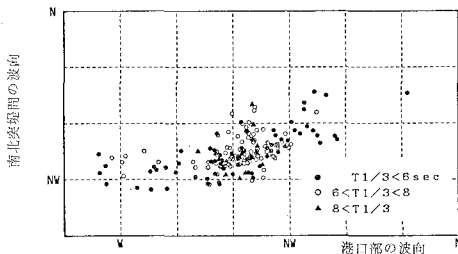
a) 南北突堤間 (P_1 地点) の波浪特性

図-4 は、港口部で $H_{1/3} \geq 1\text{ m}$ の波浪を対象として、港口部と南北突堤間の波高比および波向の比較を周期別に示したものである。波高比に関しては、周期の効果は顕著に現れておらず、港口部における波向と深い関係にあり、波向が W から N に変化するにつれて南防波堤の遮蔽効果が低下し、波高比がほぼ線形的に増加している。

一方、波向も明らかに南防波堤の回折波としての特性を反映しており、W~WNW 波の場合は、南防波堤の遮蔽域となり、港口部の波向とは無関係に、南防波堤先端からの回折波の波向 (NW 方向) にほぼ等しくなっている。これに対して、NW~N 波の場合は、南防波堤の遮蔽をあまり受けずに南北突堤間まで致達するため、南北突堤間の波向は港口部の波向にほぼ追従して変化する。



(1) 港口部と南北突堤間の波高比

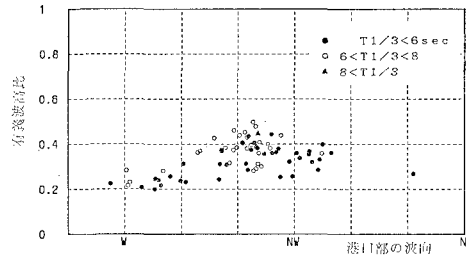


(2) 港口部と南北突堤間の波向の比較

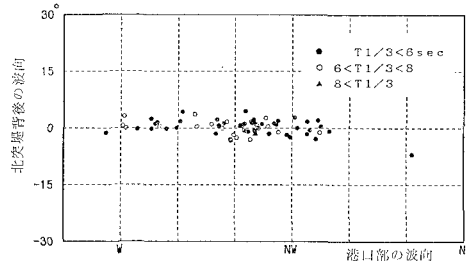
図-4 南北突堤間 (P_1 地点) の波浪特性

b) 北突堤背後 (P_3 地点) の波浪特性

図-5 は、港口部で $H_{1/3} \geq 1\text{ m}$ の波浪を対象として、港口部と北突堤背後の波高比および波向の比較を周期別に示したものである。波高比は、港口部の波向が W から NW に変化するに従って、約 0.2 から 0.4 程度と大きくなり、南北突堤間地点と同様の傾向を示すが、波



(1) 港口部と北突堤背後の波高比



(2) 港口部と北突堤背後の波向の比較

図-5 北突堤背後 (P_3 地点) の波浪特性

高比が若干小さいことや、さらに N 寄りになると波高比が低下することなどから、当地点が南防波堤と北突堤の二重回折領域であることが理解できる。

一方、当地点の波向は港口部の波向が変化してもほとんど変化せず、変動幅は $\pm 5^\circ$ 程度である。ただし、同図の波向は、当地点に設置した電磁流速計の内蔵コンパスの作動不良のため、全データの主波向の平均値を 0° としてプロットしてあり、意味を持つのは変動幅のみである。

3.4 回折による方向スペクトルの変化

南防波堤による回折に伴う方向スペクトルの変化特性を明らかにするため、表-1 に示す港口部の波向特性の異なる 3 ケースを対象として、港口部と南北突堤間の方向スペクトル解析を行った。

方向スペクトルの計算結果を図-6 にまとめて示す。同図において、上段が港口部、下段が南北突堤間の方向スペクトルとなっている。各図において、中央が方向スペクトルのコンターで、その上側が方向スペクトルを角度方向に積分して得られる周波数スペクトル、右側が方向スペクトルを周波数に関して積分して得られる方向分布関数を表している。周波数スペクトルおよび方向分布関数は、それぞれのピーク値で無次元化してある。ま

表-1 方向スペクトルの計算ケース一覧

ケース	日 時	波 向	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)
1	1/17 12:00	W (N96°W)	1.31	4.9
2	1/22 12:00	WNW (N64°W)	2.09	5.6
3	1/15 12:00	NNW (N14°W)	1.30	5.0

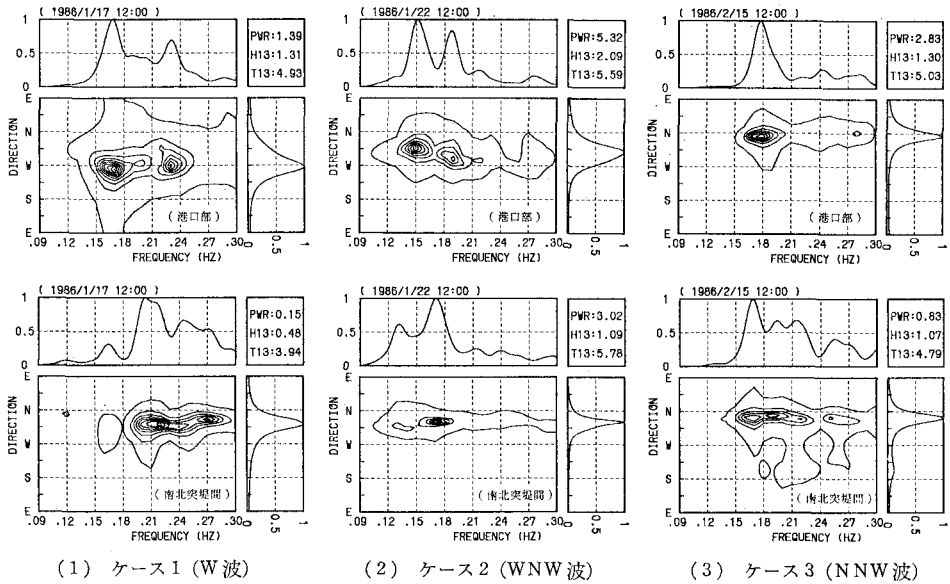


図-6 方向スペクトルの計算例

た、右上の枠内の数字は、PWR: 方向スペクトルのピーク値 ($\text{m}^2 \cdot \text{s} / \text{rad}$) および H13: 有義波高 (m), T13: 有義波周期 (s) である。

a) ケース1: 1/17 12:00

港口部の入射波は、W 寄りで $f=0.17$ と 0.23 Hz 付近にピークを持つ双峯型の周波数スペクトルを有しており、方向分布関数はゆるやかで集中度は低い。

一方、南北突堤間においては、周波数スペクトルのピーク位置が 0.21 Hz 付近に変化しているとともに、方向分布関数の集中度が高くなり、ピーク波向が南防波堤先端付近を見通した角度 ($N50^\circ W$) に近くなっている。

以上より、南北突堤間地点は、W 寄り波に対して完全に回折領域に位置し、南防波堤により入射波の $N50^\circ W$ 以西の成分のエネルギーが大幅にカットされ、一方向性波浪場に近い状態となることが理解できる。

b) ケース2: 1/22 12:00

港口部の入射波は、風波性の波浪でケース1と同様に双峯型の周波数スペクトルを有しており、波向は WNW である。

南北突堤間の方向スペクトルの変化は、ケース1のW 寄り波と類似した傾向を示しており、波向は $N50^\circ W$ 付近に移動し、方向集中度も高くなっている。ただし、周期は港内でやや長くなっており、ケース1とは異なる。これは、ケース1の場合、港口部の方向スペクトルのコンターが左下りとなっているのに対し、このケースの場合左上りとなっており、周期の長い成分が N 寄りであることと深い関係にあるものと思われる。

c) ケース3: 2/15 12:00

調査期間中最も N 寄りの高波浪で、入射波のピーク

波向は $N14^\circ W$ である。周波数スペクトルは3ケース中、唯一の単峯型で $f=0.18$ Hz 付近にピークを有する。

このケースは、南防波堤の遮蔽をあまり受けない波向であるとともに、方向集中度が高いため、南北突堤間の方向スペクトルは港口部のそれと良く似ているが、ピーク波向は、逆にやや W 寄りとなっている。これは、非常にわずかであるが、北防波堤の遮蔽により NE 寄りの波のエネルギーがカットされたためと考えられる。

3.5 反射率の推定と方向スペクトル

図-1 の P_2 地点における観測結果より、南防波堤の反射率の推定を行う。反射率の推定には、前述したように2種類の方法があるが、今回は計算値のバラツキが比較的小さかった方向スペクトルの入・反射波のエネルギー比より推定した反射率を示す。

数値シミュレーション結果によれば、計器と反射面の距離を x 、波長を L とすると、方向スペクトルの推定に対しては $x/L < 0.2$ 、反射率の推定に対しては $x/L < 0.5$ とすれば見かけのピークの影響が少なく、推定精度を確保する上で好ましい。したがって、反射率の推定は $x/L < 0.5$ ($x=32$ m) となる低周波数帯 ($0.03 \sim 0.15$ Hz) の入・反射波のエネルギー比のみを用いることとした。

反射率の推定は、対象とする低周波数帯に大きなエネルギーを含むように、港口部で $T_{1/3} \geq 7$ sec の波のうち、 P_2 地点で波高の大きいものから10ケースを選んで行った。推定反射率は、抽出10ケースともほぼ同様の結果 ($0.77 \sim 0.99$) となっており、平均的な反射率は 0.86 である。南防波堤の構造は無消波タイプの直立ケーソンであり、一般的な概略値 ($0.7 \sim 1.0$)⁹⁾と比較しても妥当な

結果となっており、本方法が現地における反射率推定方法として有効であると考えられる。

図-7 に、反射率推定ケースのうち1ケースの方向スペクトルの計算例を示す (EMLM を入・反射波共存場に拡張した式 (1), (2) で計算した結果)。ここで、方向スペクトルの縦軸の角度は、南防波堤背面直角方向から来る波向を 0° とし、反時計回りに定義している。同図の計算結果のうち $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲に着目すると、約 65° の方向から波が来襲し、 90° を反射面として約 115° の方向より反射波が発生している様子がわかる。この結果は、堤体に対して比較的平行な角度から波が来襲する場合、反射波は発生しにくく、沿い波へと転化するという一般的な認識とは矛盾する。しかし、入射波のピーク波向が南防波堤先端からの回折波向にほぼ等しくなっていることや、入・反射波の位相関係を考慮していない EMLM の結果 (図-8) においても分解能は良くないもののほぼ同じ角度にピークがあることより、図-

7 の結果は比較的妥当な結果と思われる。ただし、 $180^\circ \sim 300^\circ$ の範囲のピークは、防波堤の形状や EMLM の結果から判断すると、計算上の見かけのピークと考えられる。

4. ま と め

複雑な防波堤形状を有する港内において、波高計と流速計の組合せによる波浪観測を実施し、方向スペクトルの変化に及ぼす回折の効果を、入射波の波向別に明らかにするとともに、直立ケーソン前面における方向スペクトルの入・反射波エネルギー比より反射率の推定を行った。3成分アレイによる観測結果から式 (1), (2) を用いて比較的精度の高い反射率が得られることが明らかとなり、今後の現地における各種構造物の反射波調査への適用性が高いものと考えられる。

最後に、本研究は、東京電力株式会社の取放水設備の水利設計に関する研究の一部として実施したものであることを付記するとともに、研究の実施に当り快く計器を提供していただいた電力中央研究所の関係諸氏に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司：方向スペクトルの推定における MLM の拡張，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 173~177, 1984.
- 小舟浩治・橋本典明：最大エントロピー原理 (MEP) を用いた方向スペクトルの推定，第 32 回海岸工学講演会論文集，pp. 159~163, 1985.
- 鹿島遼一・丸山康樹・平口博丸・鈴木和三郎・田中典明：複雑な海底地形上における波浪変形現地観測と解析，第 33 回海岸工学講演会論文集，pp. 123~127, 1986.
- 泉宮尊司・磯部雅彦・清水琢三・大下哲則：回折領域における波浪場の現地観測，第 33 回海岸工学講演会論文集，pp. 129~133, 1986.
- 磯部雅彦・近藤浩右：入・反射波共存場における方向スペクトルの推定法，第 30 回海岸工学講演会論文集，pp. 44~48, 1983.
- 近藤浩右・赤間正幸・金子和幸・奥 武之：大村湾における反射波観測と護岸反射率の推定，第 32 回海岸工学講演会論文集，pp. 500~504, 1985.
- 合田良實：新体系土木工学 80 海洋・港湾調査法，土木学会，pp. 89~131, 1986.
- 合田良實：港湾構造物の耐波設計——波浪工学への序説——，鹿島出版会，pp. 68~72, 1977.

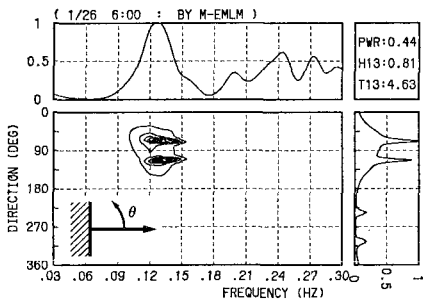


図-7 拡張 EMLM による方向スペクトルの計算例

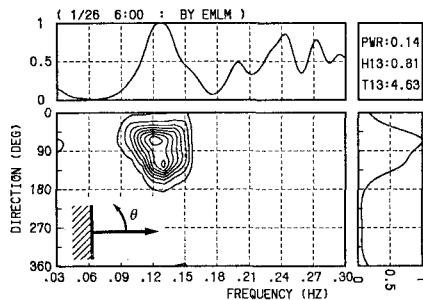


図-8 EMLM による方向スペクトルの計算例