

富山湾の沿岸波浪の特性（第1報）

著者	磯崎 一郎
雑誌名	防災科学技術総合研究報告
号	25
ページ	3-15
発行年	1971-03-10
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002622/

富山湾の沿岸波浪の特性 (第1報)

磯崎 一郎

気象庁気象研究所

On the Characteristics of Coastal Waves on the Coast of Toyama Bay (Report I)

By

Ichiro Isozaki

Meteorological Research Institute, Tokyo

Abstract

The purpose of this report is to show the characteristics of coastal waves on the coast of Toyama Bay. At first, the wave records taken at Ebie for Feb. 22 to 24, 1966 are analysed by using the wave spectrum. The waves on the morning of Feb. 23 are clearly the wind waves caused by strong northeasterly winds, and the process of the growth of these waves is qualitatively represented by the modern theory of wave generation. The waves on the night of Feb. 23 are swells which have narrow spectral bands accompanied with higher harmonic components.

Next, the modifications of waves in the coastal shallow water are considered. When waves or swells propagate into shallow water, a number of modifications take place: refraction, shoaling and energy losses. Among them the effect of refraction is the most predominant cause of controlling the local characteristics of coastal waves. So the wave refraction analysis is applied to the representative three types of the coast of Toyama Bay, and the local characteristics of coastal waves on these coasts are discussed.

1. はしがき

海岸浸食や漂砂の現象に対して沿岸波浪が大きな役割を果たすことは周知のとおりであるが、野外での観測資料が少なかったことと、実際の大洋の波の研究が十分に進んでいなかったことにより、沿岸波浪の重要性については主として模型実験的に究明されてきた。近年沿岸開発の機運が進むにつれて、海岸防備に対する要求は具体的になり、したがって波浪の特性についても詳細かつ実際の性質を明らかにしなければならなくなってきた。

富山湾では高波あるいはうねりによる波浪害が相当ひんぱんに起こっている。特にいわゆる“寄り回り波”として知られている現象はこの地方に特有のもので、しばしば大きな被害を起こしている。その特性や成因などについて、今まで多くの人によって調べられているが、信頼しうる観測資

料が少なかったため定性的な推論がなされていたにすぎない。現在においてもなお、十分な観測記録があるとはいえないが、利用できる貴重な少量の資料を用いて富山湾沿岸波浪の特徴の一端を明らかにしてみたいと思う。また、沿岸の海底地形が波浪に及ぼす影響を屈折図を用いて具体的に示し、沿岸波浪を考える際の一助としたい。

2. 昭和41年2月22～24日の波浪について

昭和41年2月21日朝、台湾の北東方で発生した低気圧は22日午前には九州西岸に達した(中心気圧1008 mb)。その後、発達しながら北東に進み、22日21時には東海地方にあって中心気圧1001 mbとなり、22日9時には北海道南東海上に達して中心気圧984 mbとなった。この低気圧の通過に伴い富山湾沿岸では北東のち北西の風が強

まり、23日午前には顕著な風波が、そして同日夜半前には寄り回り波が起って各所に被害を生じた。

この時、田中海岸では建設省北陸地方建設局の手によって波浪観測が行なわれており、また海老

江海岸では運輸省第一港湾建設局によって波浪観測が実施されていた。田中海岸の観測では23日9時に有義波高364 cmを観測し、その後、徐々に弱まって23日23時には81 cmになっている。一方、海老江海岸の場合には23日10時に413 cm

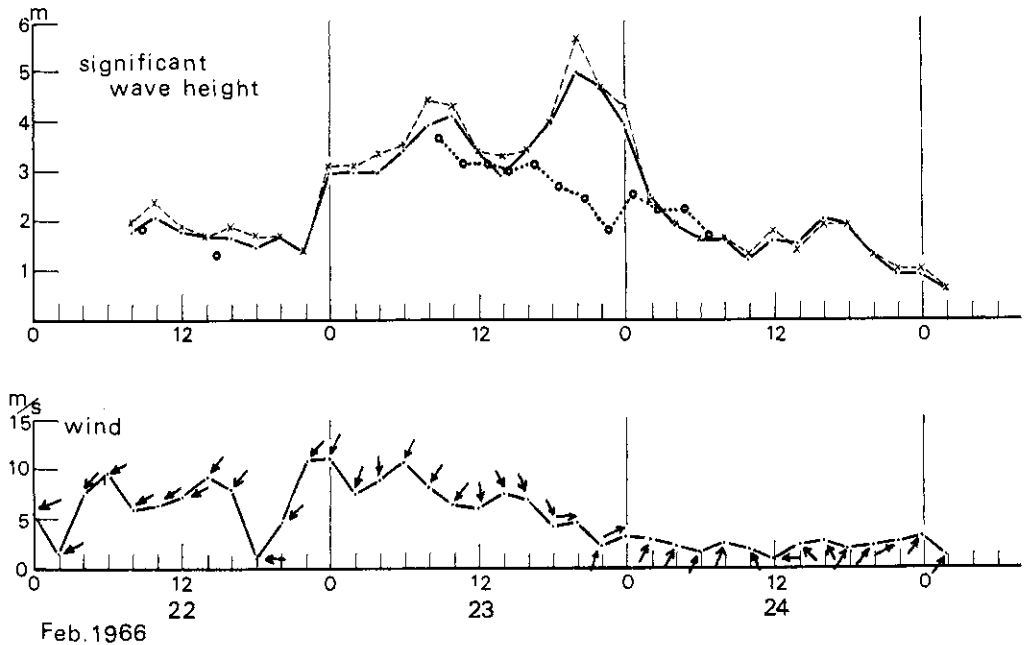


図1 上：実線と波線は海老江の有義波高、点線は田中の有義波高。下：海老江の風。

Upper: Full line and broken line are significant wave height taken at Ebie and dotted line is at Tanaka.

Lower: Wind taken at Ebie.

の有義波高を観測し、その後いったん弱まって14時には293 cmとなったが、夕刻から再び高まり20時には502 cmを記録している。風の観測からも明らかなように、23日午前の高波は風波であって田中海岸、海老江海岸ともほぼ共通に起こっている。海老江における23日夜の高波は寄り回り波であると思われる。

図1には22日～24日の田中海岸および海老江海岸における有義波高の変化、および海老江における風の変化を示す。北陸地方建設局および第一港湾建設局では有義波高は、記録紙上の見かけの波の1/3最高波の平均波高として求めている。この値の精度を検証するために、海老江海岸の場合について、スペクトル解析から波エネルギーの値

E を求め、Longuet-Higgins (1952)の結果を用いて

$$H_{sig} = 2.83 \sqrt{E}$$

なる関係から有義波高を求めた。この結果は図1で破線で示してあるが、二つの異なった方法で求めた値はかなりよく一致している。したがって、いずれの方法によっても実用上さしつかえないことがわかった。

海老江海岸の波高変化を見ると、この期間中の波は次の4段階に分けられる。

- | | |
|----------------|---------|
| 1) 22日 8時～22時 | 以前の波の減衰 |
| 2) 23日 0時～12時 | 第1の波高増大 |
| 3) 23日 16時～22時 | 第2の波高増大 |
| 4) 24日 0時～6時 | 波の減衰 |

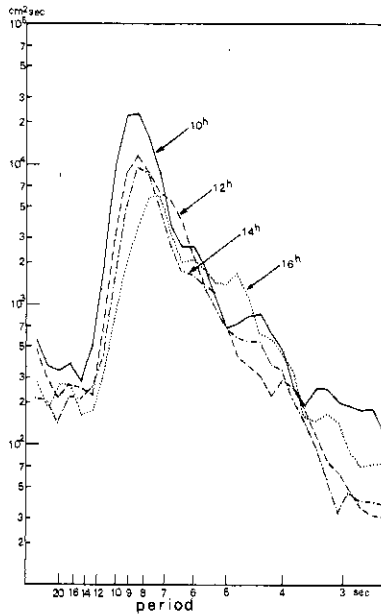


図2 昭和41年2月22日10～16時の海老江の波スペクトル。

Wave spectra taken at Ebie at 10 to 16 h, Feb. 22, 1966

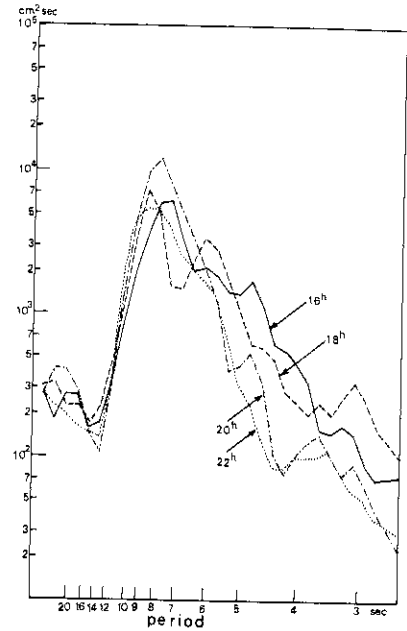


図3 昭和41年2月22日16～22時の海老江の波スペクトル。

Wave spectra taken at Ebie at 16 to 22 h, Feb. 22, 1966.

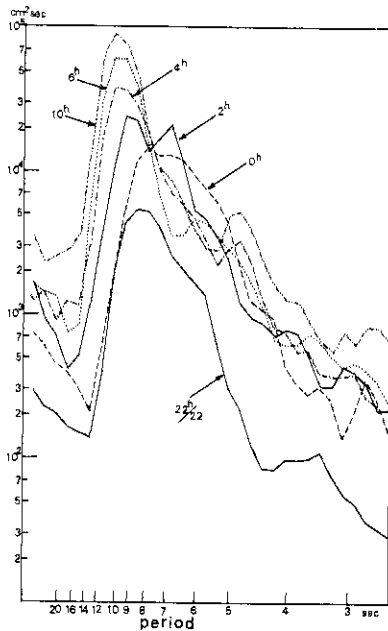


図4 昭和41年2月23日0～10時の海老江の波スペクトル。

Wave spectra taken at Ebie at 0 to 10 h, Feb. 23, 1966.

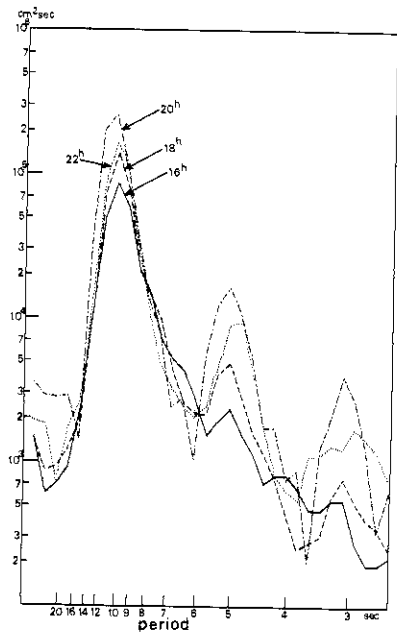


図5 昭和41年2月23日16～22時の海老江の波スペクトル。

Wave spectra taken at Ebie at 16 to 22 h, Feb. 23, 1966.

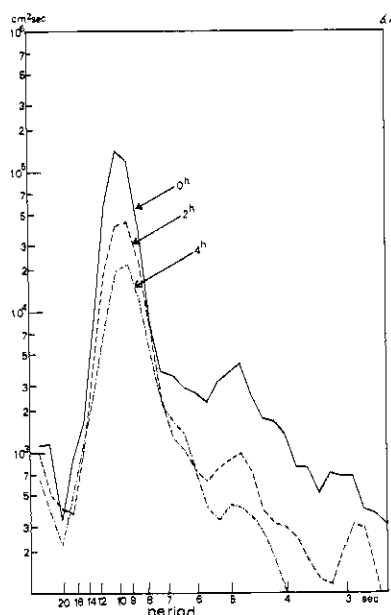


図6 昭和41年2月24日0～4時の海老江の波スペクトル。

Wave spectra taken at Ebie
at 0 to 4 h, Feb. 24, 1966.

これらの段階における海老江海岸の波の消長の特性を波浪スペクトルによって調べた。なお、スペクトル解析はBlackman, Tukey (1958)の方法に従って行なったが、波高観測時間間隔は1秒、データ個数は550、遅れは50とし、Hanningの平滑係数を用いた。

第1の段階の前半における波浪スペクトルを図2に、また後半のスペクトルを図3に示す。図2ではスペクトル密度の減少が低周波領域で起こっており、スペクトル密度の最大は低周波側から高周波側へと移動している(周期では9秒から7秒に減少)。この期間中は高周波側のスペクトルの形状はほとんど変化なく、またその配は f^{-5} 則にはほぼ一致しているからこの領域でのエネルギー密度は飽和の状態にあると考えられる。一方、図3では低周波領域でのエネルギーの減少が目立たず、高周波領域での減衰が顕著である。エネルギー密度最大の周期は約8秒である。

この期間中に海老江で8～10 m/sの北東風が記録されているが、天気図からみるとこれは海岸近傍の局所的な風であると思われる。この段階の前半のスペクトルで高周波領域が飽和しているのはこの局所的な風によって起こった波があるためであろう。後半では風が弱まっている。

第2の段階における波浪スペクトルを図4に示す。低気圧が北東進して東海地方を通過した22日21時ごろから富山湾一帯に北東風が強まり、波浪スペクトルの生長が始まった。22日22時まで減衰してきたスペクトル密度は2時間後の23日0時には高周波領域で一様に増大した。その配はほぼ f^{-5} 則に従っているから、約2時間の間に飽和状態に達したものであると思われる。23日0時から10時まで、エネルギー密度は低周波領域に向かって規則正しく増加しており、エネルギー密度の最大の周期は0時に8秒であったものが10時には10.2秒となっている。発達途中の過程において行過ぎ(Overshooting)の現象がみられる。このようなスペクトルの成長の仕方は風波の発達に際して一般的に見られるものである。

10時から16時までにはほぼ同じようなスペクトルの形状を示した。

第3の段階における波浪スペクトル分布を図5に示す。図1からも明らかなように、この期間には風はすでに5 m/s以下に弱まっており、田中海岸の波浪は一様に減少しているにもかかわらず海老江海岸では波高が増大している。明らかにこれは風波ではない。図5において、18時、20時、22時のスペクトルは約10秒の所にエネルギー密度の最大があり約5秒および約3.3秒の所に第2、第3のエネルギー密度の最大が見られる。この第2、第3の最大は第1の最大の高調波をあらわすものと考えられる。バンド幅が狭いスペクトル分布を持つ波(たとえばうねりのようなもの)が海岸に入射すると高調波が形成されることはよく知られたことである。実際、図5において第1のエネルギー最大のバンド幅を見ると7～12秒であって図4のスペクトルと比べてかなり狭いことがわかる。このようなエネルギー分布の特徴は20時のスペクトルにおいて最も顕著である。

スペクトル的に見ると、この波は確かにうねり性のものであるが、これが日本海の沖合から侵入したものとすると、23日9時ごろ秋田沖の北北東の強風で形成された波がうねりとして伝搬してき

たものと考えて時間的にはよく合う。これが田中海岸で観測されていないのは佐渡島のしゃへい効果によるものかもしれないが、さらに検討を加える必要があるであろう。

第4の段階における波浪スペクトルを図6に示す。これは寄り回り波の減衰期のスペクトル変化を表わしている。周期10秒のエネルギー密度最大の値は時間とともに一様に減少しているが、周期6秒以下の高周波領域でのエネルギー密度の減少の方がさらに顕著である。それにもかかわらず周期約5秒と3秒の所の高周波の存在は識別できる。このようなことから、ここでのスペクトルの減衰は周期約10秒のうねりのエネルギー密度の減衰に伴ってこれの高調波が急速に弱まったことを表わしているものと考えられる。したがって、23日18時から24日2時にかけての波浪スペクトルで、高周波領域のエネルギーの大部分はうねりの高調波として形成されたもので、局所的な風波によるものではない。

22日～24日の波浪スペクトル全体を通じて、

低周波側のこう配が非常にけわしいことが目立つ。そして、最も低周波側まで発達したスペクトルをみても、エネルギーは大略14秒以下の周期の所にある。したがって、少なくとも今回の例に関するかぎり周期14秒以下の成分波を考えればよい。

3. 富山湾の沿岸波浪の局地的特性

外海の波浪が海岸に接近すると、屈折効果、浅水効果、回折効果、浸透効果などの影響を受ける。これらのうち特に局地的特性を支配する最大のもは屈折効果である。ここでは、富山湾内の三つの海岸（石田海岸、高月海岸、海老江海岸）について屈折図を作成して屈折係数を求め沿岸波浪の局地的特性を明らかにする。屈折図はWilson (1966)の方法に従って電子計算機を用いて作成した。

3.1 石田海岸

富山湾の東岸の代表として片貝川と生地との間の石田海岸を選定した。海岸線および計算のために用いた格子を図7に示す。格子間隔は100mであるから約3 kmの海岸線を含んでいる。図中の鎖線は等深線をあらわす。また、この図中で10 mの等深線上に丸印と数字で示した点は屈折効果を求めた地点である。屈折図は、外海の波が北、北北西および北西の方向から侵入するとした場合について周期4秒から2秒間隔に20秒までの波について作成した。これよりさらに西寄りの波は湾内で発生するものであるから吹送距離が短く、したがって被害を起こすほど大きな波にはならないのでここでは省略した。

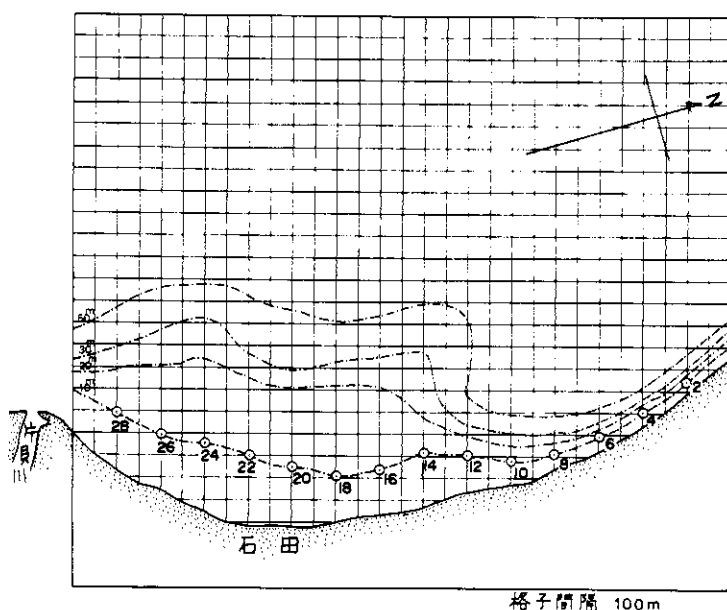


図7 屈折図計算のための石田海岸の格子。鎖線は等深線、また10 m等深線上の丸印と数字は屈折効果を見積もった地点。

Grid for computation of wave refraction on Ishida coast. Dash-dotted lines are depth contours, and circles and numerals are the points on which wave refraction effects are estimated.

図8には、1例として周期10秒の波が北の方向から侵入する場合の屈折図を示した。図中の波線(Wave ray)の上のきざみは波の峰が20秒間に進む距離をあらわすから、これを横に

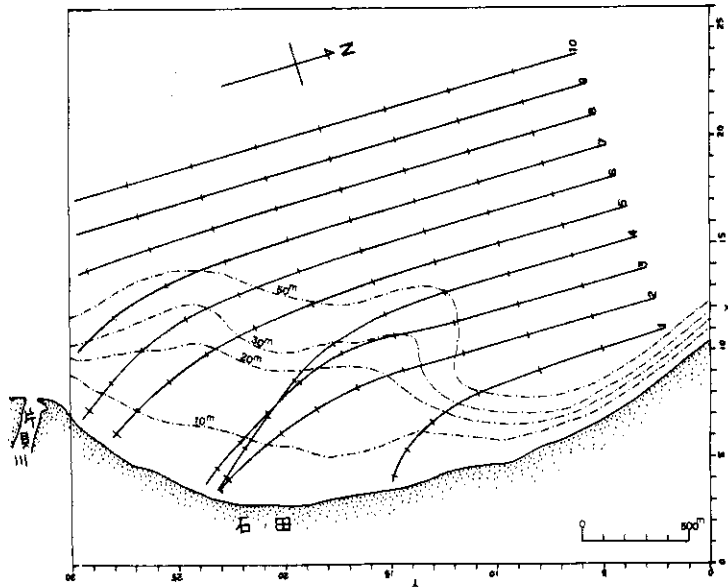


図8 石田海岸の屈折図の1例：周期10秒。

An example of wave refraction chart on Ishida coast :
wave period 10 sec.

結ぶと波面(Wave front)が得られる。なお、ここで周期10秒の波を選んだのは前節の解析で周期約10秒の波が最も大きなエネルギーを持っていたからである。

この図で、石田海岸の点22付近に波線が収束し、その両側で発散していることから、点22付近で特に波が高くなることが想像される。

図9には、周期10秒の波が北、北北西および北西の方向から来た場合に石田海岸付近の水深10mの等深線上でどのような屈折効果の局地性を持つかを示した。この図で横軸は図7に示した10m等深線上の地点であり、縦軸は b_0/b

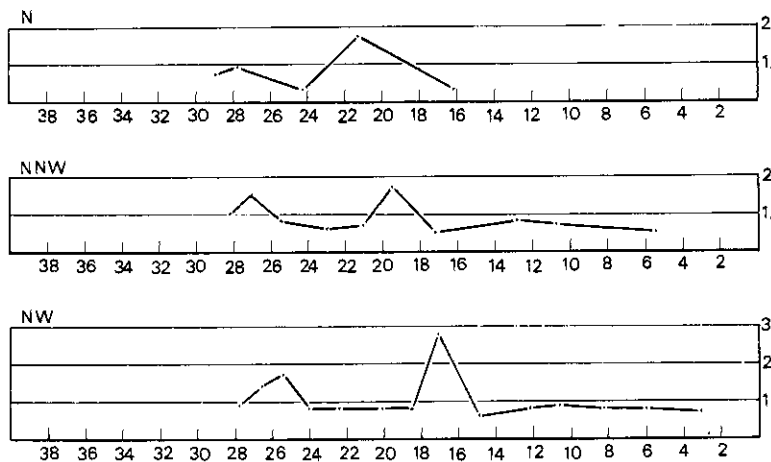
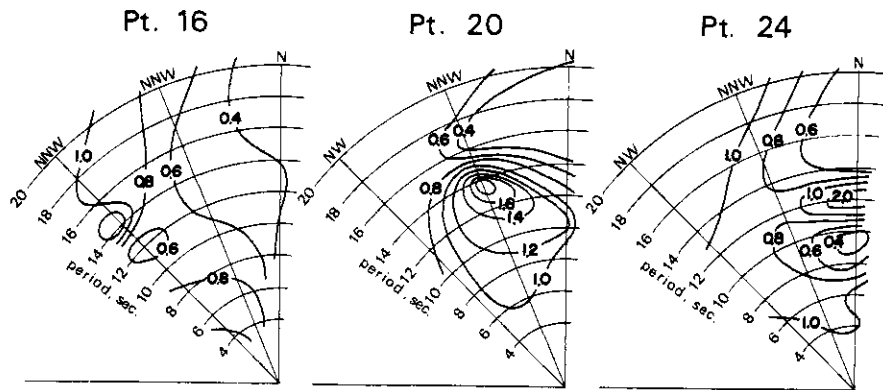


図9 周期10秒の場合の b_0/b の分布。横軸は図7に示した10m等深線上の地点。

Coastal distribution of b_0/b for the case of 10-sec wave period.
Abscissa: points on the 10-m depth contour shown in Fig. 7.

(すなわち屈折係数の二乗)である。ここで b_0 および b は屈折図における相隣れる波線の間隔の深水および浅水における値である。これによると、北から来る波は点22付近で高く、それからわずかに200m南の点24で著しく小さくなる。北北

西から来る波は点20および点27で高まり、点17および点23付近で小さくなる。北西から来る波は点17と点26付近で高まり、点15および点21付近で小さくなる。このように、波が侵入する方向によって沿岸の波が高まったり


 図10 地点16, 20, 24における b_0/b の値.

Values of b_0/b for various wave directions and periods at the points 16, 20 and 24 shown in Fig. 7.

低くなったりする場所が異なるのは石田海岸の前方に比較的水深の浅い部分が突出しているためである。周知のとおり、富山湾には幾多の海谷が発達しており、海谷と海谷の間にはこれと似た浅い部分が存在するので、このような場所では同様の性質が現われるであろう。

図10には点16, 点20および点24における b_0/b の値を波の周期別、方向別にまとめて示した。これらの地点は順に約400 mしか離れていないにもかかわらず波の屈折効果は著しく異なっている。点16においては波がいずれの方向から侵入しても波高は沖合における値よりも小さくなり、

特に北から侵入する波の場合に減衰が大きい。点20においては、北北西から来る12~14秒の周期の波は屈折の効果で高まる。北から来る14秒以上の周期の波は著しく減衰するが、このような長周期の波は実際的には大きなエネルギーを持って存在することはないであろう。点24においては北から侵入する周期12秒の波が著しく高くなるが、その他は一般に減衰し特に8~10秒の北から来る波の場合に著しい。

3.2 高月海岸

湾の中央部の代表的海岸として高月を中心とした浜黒崎から高塚までの海岸を選んだ。海岸線および計算のために用いた格子を図11に示す。格子間隔を200 m

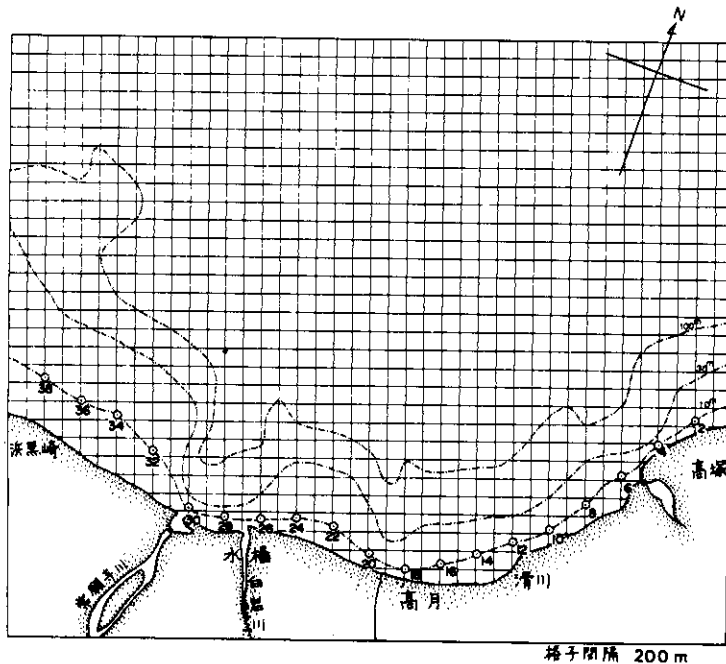


図11 屈折図計算のための高月海岸の格子。説明は図7を参照。

Grid for computation of wave refraction on Takatsuki coast. See legend in Fig. 7. for explanation.

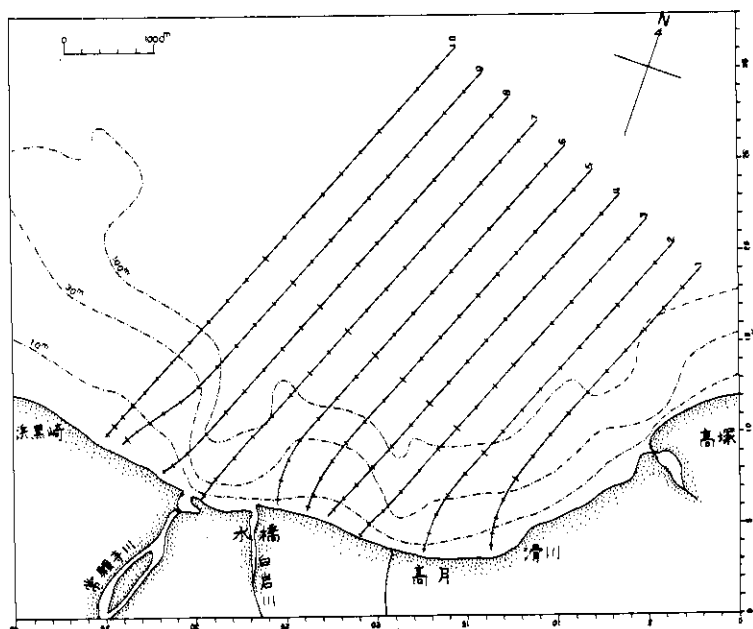


図12 高月海岸の屈折図の1例：周期10秒。

An example of wave refraction chart on Takatsuki coast: wave period 10 sec.

としたから約10 kmの海岸線を含んでいる。図中の鎖線は等深線であり、また10 m等深線上の丸印と数字で示した点は屈折効果を求めた地点である。海岸地形の特徴は、常願寺川洋谷をはさんで西側には水深の浅い区域が広がり、東側では海岸に沿った浅水域が狭く岸のすぐ近くまで深くなっている。このため高月海岸一帯では深海の波があまり形を変えないまままで岸近くまで接近するであろう。

屈折図は北東、北北東、北、および北北西の方向から来る波について、周期4秒から2秒間隔に20秒までの場合について作成した。この方向より外側の方向から来る波は対岸距離が限られているためあまり大きな

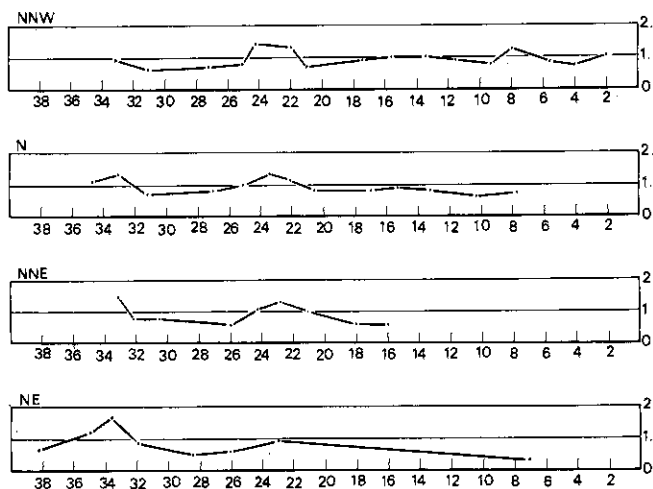


図13 周期10秒の場合の b_0/b の分布。横軸は図11に示した10 m等深線上の地点。

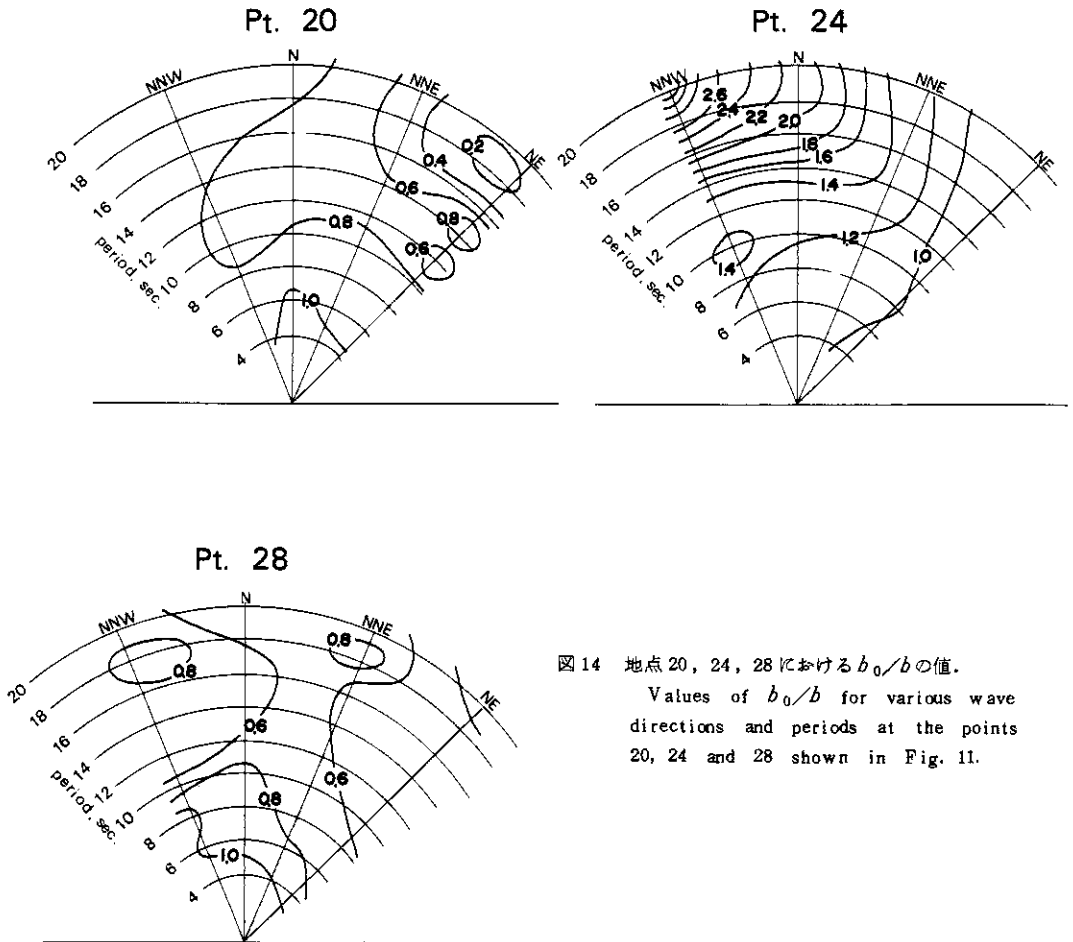
Coastal distribution of b_0/b for the case of 10-sec wave period. Abscissa: points on the 10-m depth contour shown in Fig. 11.

波はないと考えられるので省略した。

図12には1例として、周期10秒の波が北北東の方向から侵入する場合の屈折図を示した。図8の場合と同様に波線上のきざみは波が20秒間に進む距離をあらわす。等深線の分布から期待されたように、波は沖合1000 mぐらいに接近するまでほとんど深海波としての形状を保存している

ことがわかる。波がさらに海岸に接近すると屈折効果が現われ、波線は水橋の東約500 m付近で収束し、高月、滑川方面で発散している。常願寺川から西の海岸でも収束が見られるがこれは石田海岸の場合と似た性質を持つであろう。

図13は周期10秒の波が北北西、北、北北東および北東の方向から高月海岸に接近したとき、



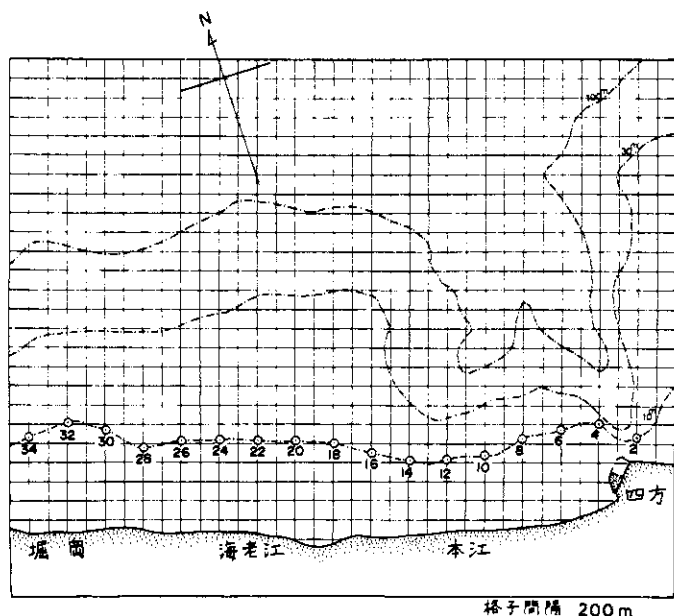


図15 屈折図計算のための海老江海岸の格子。説明は図7を参照。

Grid for computation of wave refraction on Ebie coast. See legend in Fig. 7 for explanation.

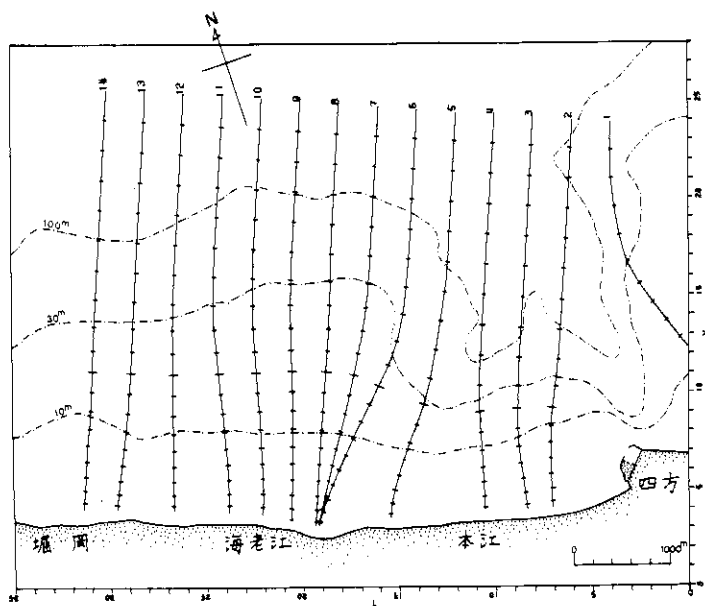


図16 海老江海岸の屈折図の1例：周期10秒。

An example of wave refraction chart on Ebie coast: wave period 10 sec.

の波については北北西、北、北北東のいずれの方向から来る場合でも波エネルギーは深海のそれと比べて約30%ぐらい増すであろうことが期待される。点28においては、短周期成分を除いて考えると、いずれの方向、いずれの周期の波の場合でもエネルギーは20~40%ぐらい減少する。

この海岸では、いずれの方向と周期の波成分についても局地的特性は同じ傾向を示し、波が高目にあらわれる場所と低目にあらわれる場所がはっきりしている。したがって、海岸の保護に対して、この性質を効果的に考慮することが可能であるだろう。

3.3 海老江海岸

湾の西寄りの海岸の代表として、海老江を中心とした堀岡から四方までの海岸を選んだ。これより西の海岸は海が浅くなり、波はかなり沖合で砕波となってしまうから海岸に対する高波の影響は小さいものと考えられる。しかし一方、漂砂に対する影響は無視できないであろう。

海岸線および屈折図計算のために用いた格子を図15に示す。格子間隔は200mであるから約7kmの海岸線を含んでいる。図中にはまた10m、30m、および100mの等深線が示されている。10m等深線上に丸印と数字で示した点は屈折効果を求めた点である。この海岸は四方洋谷の西側にあたり、水深の浅い部分がかなり沖合まで広がっている。実際、10m等深線は海岸から約1000mの沖合となっている。

屈折図は外海の波が北東、北北東、北、および北北西の方向

から侵入するとした場合について、周期4秒から2秒間隔に20秒までの波について作成した。この方向より外側の方向から来る波は対岸距離が限られているため波高、周期ともあまり大きくならないであろうからここでは省略した。

図16には1例として、周期10秒の波が北北東の方向から侵入する場合の屈折図を示した。図8および図12と同様に波線の上のきざみは波が20秒間に進む距離をあらわす。北北東から侵入する波は海老江海岸に対してはほぼ直角に入射するか

ら、もし等深線が海岸線に平行であるならば屈折の効果は大きくないが、この海岸の場合、四方洋谷の存在のために屈折効果が現われ、海老江の東側の海岸で波線の収束が著しい。これと反対に、本江の西側では波線は発散している。四方洋谷付近では特に、波線の発散が著しく波はかなり減衰するであろう。

図17は周期10秒の波が北北西、北、北北東および北東の方向から海老江海岸に接近したとき、10m等深線上でどのような屈折効果の局地性を

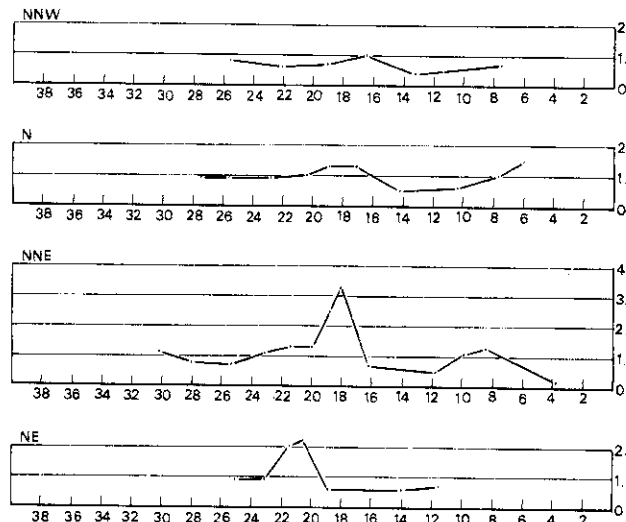


図17 周期10秒の場合の b_0/b の分布。横軸は図15に示した10m等深線上の地点。
Coastal distribution of b_0/b for the case of 10-sec wave period.
Abscissa: points on the 10-m depth contour shown in Fig. 15.

あらわすかを示した。この図で横軸は図15に示した10m等深線上の地点であり、縦軸は b_0/b の値である。この図によると、波の侵入してくる方向が北北西から時計回りに北東へと移るに従って波線が収束する場所が点17から点23へと順次に西に移動している。特に、北北東から来る波の場合に点18における b_0/b の値は3.3にも及んでいる。点14付近ではいずれの場合にも波線は発散し、波が小さくなる傾向がある。

図18には点14、18および24における b_0/b の値を波の周期別、方向別にまとめて示した。点14においては北あるいは北北西から来る周期8秒の波、および北東あるいは北北東から来る周期12~14秒の波の場合に b_0/b の値が大きく、屈

折効果によって沿岸波浪が高まることが期待される。興味深いのは周期10秒の波についてはいずれの方向から来る場合にも波高が減少することである。周期16秒以上の波は存在したとしても大きな影響を及ぼすとは考えられないから、点18においてはいずれの方向、いずれの周期の波の場合でも屈折効果によって波が高まることがわかる。特に、北北東および北東から来る周期10~12秒の波の場合には波のエネルギーは深海における値の2倍以上にもなる。点24においてはいずれの方向から波が侵入しても波高が深海波の波高より小さくなるように屈折効果が作用する。そして、この傾向は周期が増すにつれて著しくなる。

富山湾は北北東の方向に湾口が開いているので

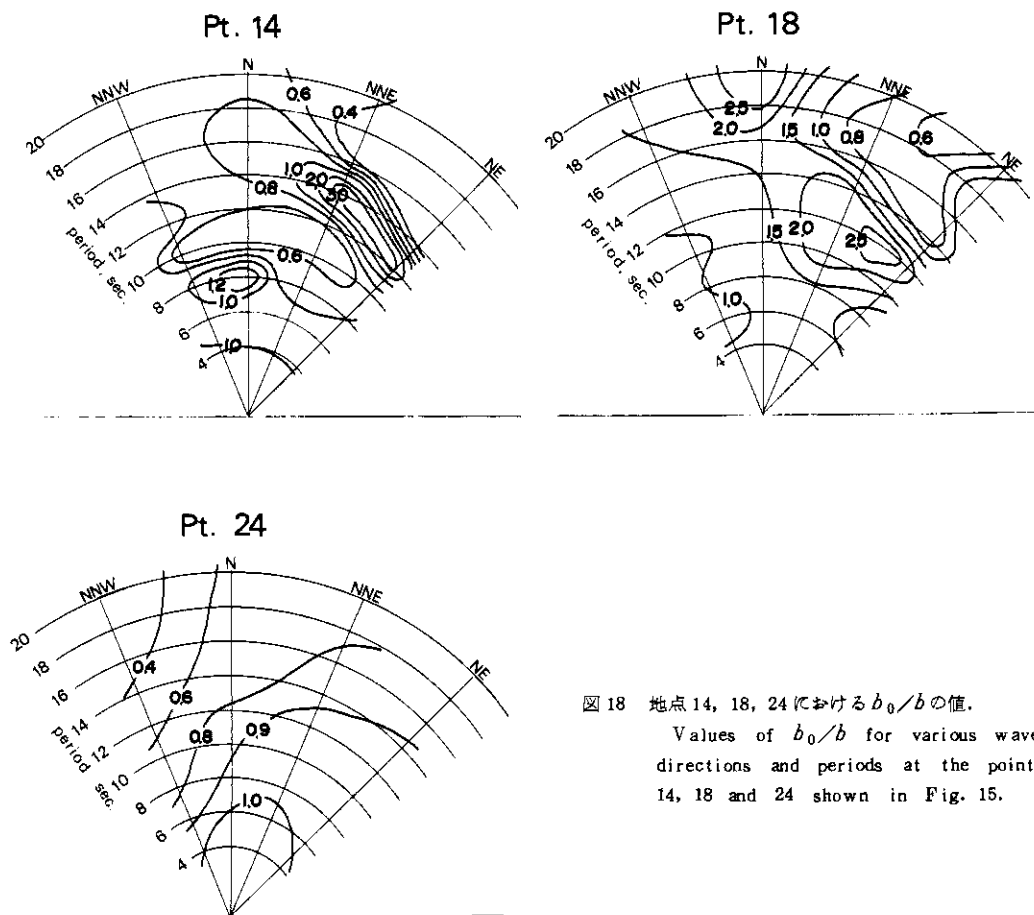


図18 地点14, 18, 24における b_0/b の値。
Values of b_0/b for various wave directions and periods at the points 14, 18 and 24 shown in Fig. 15.

外海の北ないし北東方向からの波が最も侵入しやすいはずであって、この場合、海老江海岸には屈折効果によって特に大きな波が襲来するはずであろう。なお、第1節で述べた海老江の波浪観測は点23の近傍で行なわれている。ここでは、北ないし北東の波に対しては屈折効果はあまり大きくない。

4. むすび

沿岸波浪の特性を知るためには、外海から侵入する波の特徴と、海岸での地形効果とを知らなければならない。ここでは前者の目的のために昭和41年2月22～24日の波浪の性質をスペクトル解析の立場から調べた。その結果、明らかに風波とみなされるものと、うねり性のいわゆる“寄り回り波”の存在がはっきりした。しかし、その成因について量的な議論をするためには今後さらに

多くの観測を行なわなければならないであろう。

後者の目的のために、湾内の三つの海岸について、それぞれの波の向きとそれぞれの周期の波の屈折図を作成した。沖合での波の性質が明らかになると沿岸波浪の特徴がかなり詳細に推論できる見通しがついた。

近年、漂砂量と沿岸波浪のエネルギーとを関係づける試みがWatts (1953), Caldwell (1956), Fairchild (1966) らによって試みられているが、動的波候を明らかにするとともに漂砂の観測を精力的に行なってこれらに関係づけることを試みるのも重要なことであろう。なお、物理的にはBowen (1969)は波による水の堆積(Wave set-up)の局地的な相違からリップカレント(rip current)が生じ、これが漂砂の一因となるであろうことを暗示しているが、今後検討するに値する考えであると思う。

この研究の今後の目標は、幾例かの事例研究 (case study) を行なって波浪の特徴を調べるとともに、天気図解析と関連づけた富山湾の動的波候を明らかにすることであって、気象研究所が富山地方気象台と協力して推進する。

終わりに、この調査にあたり波浪記録や浅深測量の資料を使用させていただいた第一港湾建設局と北陸地方建設局の関係機関に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Blackman, R. B. and J. W. Tukey (1958): *The Measurement of Power Spectra*. Dover, New York, 190p.
Bowen, A. J. (1969): The generation of longshore

- currents on a plane beach. *J. Mar. Res.*, **27** (2), 206-215.
Caldwell, J. M. (1956): Wave action and sand movement near Anaheim Bay, California. *Beach Erosion Bd. Techn. Mem.* No.68.
Fairchild, J. C. (1966): Correlation of littoral transport with wave energy along shores of New York and New Jersey. *U. S. Army Coastal Engng. Res. Center Techn. Mem.* No.18.
Longuet-Higgins, M. S. (1952): On the statistical distribution of the heights of sea waves. *J. Mar. Res.*, **11** (3), 245-266.
Watts, G. M. (1953): A study of sand movement at South Lake Worth Inlet, Florida. *Beach Erosion Bd. Techn. Mem.* No.42.
Wilson, W. S. (1966): A method for calculating and plotting surface wave rays. *U. S. Army Coastal Engng. Res. Center Techn. Mem.* No.17.