

II-82

津波数値シミュレーションによる
エッジ波の検出

北海道大学工学部 正員 高 橋 將

1. はじめに

内浦湾口の地球岬から、襟裳岬を経て根室半島に至る北海道太平洋沿岸には、苫小牧・浦河・十勝・釧路・花咲の5港に検潮所があり、常時潮位観測が行われている。これらの観測所で得られた、過去の多くの津波記録の解析により、観測場所や個々の津波の性質の違いによらない、多くの共通な周期を示す波動スペクトルの存在が明らかになっている [1]。その特徴的な例として、釧路港の津波記録のFFT解析結果を図-1に示す。

これらの津波は、発生場所・海底変位の形態や規模が異なるにも関わらず、また伝播経路も到達波高も同じではないにも関わらず、各観測記録に共通するスペクトルが多く出現している。図-1には、今回行ったモデル津波シミュレーションによる、釧路の周期スペクトルも併せて示したが、その中にも同様なスペクトルを見いだすことが出来る。このような特徴は、釧路に限らず、他の観測点の記録にも全く同様に存している。

またさらに、観測場所に依らない同一スペクトルが、広い範囲にわたって存在することも知られている [1]。

図-2は、上記5観測所に、えりも港で得られた記録を加え、6観測所の10の異なる津波記録合計22例をFFTによって解析し、明らかに各観測点に共通し、かつモデル津波の結果とも対応するスペクトルを抜き出して示したものである。対応するスペクトルどうし、横線で結んである。図-2では周期20minよりも短いスペクトル範囲は省略してあるが、その範囲にも図-2に見られるスペクトルの高調波成分が数多く存在している。図-2の周期範囲に限っても、25種以上の共通性の高いスペクトルが現れている。

これらのスペクトルの多くは、津波によって励起された固有振動によると考えられるが、その第一候補は、海岸線を固定端、大陸棚縁部を開放端とする陸棚セイシュである。しかし、陸棚セイシュの高次のモードの発生を考慮しても、これほど多くのスペクトルが出現する理由を説明できない。従って、固有振動の生起機構を研究する立場からは、従来あまり取り扱われることの無かった、沿岸浅海部に波動エネルギーが閉じこめられて成立するエッジ波についての考慮が不可欠と考えられる。

しかし、文字どおり点にすぎない観測点の津波記録だけでは、このような波動の実態を明らかにすることは実際上望めない。そこで、津波数値シミュレーションを行い、その結果からFFTにより周期スペクトルを求め、さらに利得が1で位相変化の生じない数値バンドパスフィルター [2, 3] を用いて、各格子点の波高時系列データ中からこれらのスペクトルを分離して、単一の波動による平面波高分布図を作成し、これらの波動現象の解明を行った。

2. 計算手法

水平 x, y 軸方向の流速 u, v を、鉛直 z 軸方向に積分し2次元化すると、長波の運動方程式と連続の式は、

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial t} &= fN - \frac{1}{(H+\zeta)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(M^2) + \frac{\partial}{\partial y}(MN) \right\} - (H+\zeta)g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\gamma^2}{(H+\zeta)^2} M \sqrt{(M^2 + N^2)} \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= -fM - \frac{1}{(H+\zeta)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(MN) + \frac{\partial}{\partial y}(N^2) \right\} - (H+\zeta)g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\gamma^2}{(H+\zeta)^2} N \sqrt{(M^2 + N^2)} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0\end{aligned}$$

となる。ここに、

$$M = \int_{-\zeta}^H u dz$$

$$N = \int_{-\zeta}^H v dz$$

である。 H 、 ζ および γ^2 は、それぞれ水深、海面上昇量および海底摩擦係数 (値 0.0026 を用いた) である。

また、 f と g は、それぞれコリオリパラメーターと重力加速度である。

計算は、これらの式を差分化した差分方程式により行った。 時間発展は標準的な Leap-Frog 法によった。 用いた計算領域の差分格子配置と、モデル津波の初期海面変位を図-3 に示す。 このモデルは、Aida [4] による 1968 年十勝沖地震の、海底変位を参考にしたものである。 計算格子のサイズは 2 種類で、大洋部は 10km×10km、大陸棚上と海岸部はその 1/3 のサイズとした。 波源域の広がりには 221km×179km で、海面変位の最高は 140cm、最低は -40cm である。 境界条件は、外洋開放境界と津軽海峡西口において、 x 軸に沿って $N = \sqrt{g(H+\zeta)}\zeta$ 、 y 軸に沿って $M = \sqrt{g(H+\zeta)}\zeta$ 、また、海岸線において、完全反射条件 $N = 0$ あるいは $M = 0$ を課した。

計算は、時間ステップ 10sec で行い、120sec ごとに波高データを取り出し、各格子点の津波波高時系列を得た。 計算開始直後には、波源の負の変位部分が、日高海岸と本州三陸海岸に囲まれた海域を北西に向かって伝播し、一方波源の東側の正の変位部分が東から北向きに屈折しながら十勝海岸から根室半島に向かう。 津波が海岸線に到達する際には、苫小牧から襟裳岬寄りの海岸では、斜め入射する。 図-4 は、津波伝播途中の波高分布の 1 例で、津波発生 40min 後の小メッシュ領域の津波を示したものである。 実線の等高線は波高が正、細い点線は負、また太い点線は波高 0 の位置を表す。 この図は、津波第 1 波が十勝海岸に到達する直前の波高分布を表しており、襟裳岬以東の海岸では、津波がほとんど法線入射する状況が示されている。 等高線間隔は 0.5cm である。

以下に、このモデル津波のシミュレーションから得られた周期スペクトルを基準として、北海道太平洋沿岸に発生するエッジ波と陸棚セイシュについて解析した結果を述べる。

表-1 に、各周期スペクトルを分離するために用いた、バンドパスフィルターの諸元を示す。

No.	分離周期	バンド幅	フィルター長	No.	分離周期	バンド幅	フィルター長
(1)	102(min)	85.0-127.5(min)	179(個)	(6)	31.8(min)	30.0- 34.0(min)	173(個)
(2)	63.7	63.7- 72.9	131	(7)	28.3	26.8- 30.0	143
(3)	56.7	51.0- 63.7	145	(8)	24.3	23.1- 25.5	157
(4)	46.4	42.5- 51.0	117	(9)	18.2	17.5- 18.9	153
(5)	39.2	36.4- 42.5	171				

表 1: バンドパスフィルターの諸元

3. 成分波の分離結果

シミュレーションによって得た、小格子各点の 335 個ずつの波高時系列に、表-1 に示した各バンドパスフィルターをかけることにより、小格子各点の成分波波高時系列が得られる。 これらの成分波時系列から成分波波高が最も大きくなる時刻を選び、その時刻の平面波高分布図を作成した。 各図の等高線間隔は、図-5(1) が 0.5cm、図-5(2) が 2cm、図-5(3) から図-5(9) までは全て 5cm である。

1) 102min 周期成分波

図-5(1) に、津波発生後 318min 時点における波高分布を示す。 図-2 に示した苫小牧と釧路の実測津波のスペクトル中には、この帯域内に含まれる成分波として、90.1min 周期の波が各 1 例ずつ見出されている。

図-5(1) から、襟裳岬以東の海岸と日高門別を中心とする胆振・日高海岸の 2 海域で、陸棚セイシュが発生していることがわかる。 しかし減衰が早く極く弱い振動である。 振幅は胆振海岸の方が幾分大である。 メリアンの公式による陸棚セイシュの周期は、日高門別で 90min、十勝港 (広尾) と十勝弧状海岸の中央に近い大

津では、共に 109min と計算される。一方、数値フィルターによって分離した、門別、大津の成分波波高時系列から周期を求めると、双方共に 2 周期の平均値として、上記の二つの計算値の中間に入る、94.5min が得られた。従って、図-5(1)の振動形態は、実測津波の 90.1min 周期成分波に対応する、基本モードの陸棚セイシュであろうと推定される。十勝側では弧状海岸の全域が陸棚セイシュの振動域となっているのに対し、日高側では弧状海岸の一部に振動域が限られるのは、図-4 で示した、津波第 1 波の入射方向の違いが原因と考えられる。なお、表-1 では、胆振・日高海岸（門別）の陸棚セイシュについて、周期 85min を通過帯域の中心とする数値フィルターによって、処理した結果で示したが、これは結局時間の経過と共に、十勝海岸の陸棚セイシュと同一の周期に落ち着くことが判った。

大津での成分波形を見ると波高は時間と共に減衰し、エネルギーが外洋へ漏れ出る陸棚セイシュの特徴を良く表している。

2) 63.7min 周期成分波

図-5(2)に、津波発生後 214 分の時点における波高分布を示す。実測津波から検出される、62.5min、63.5min、63.7min などの周期スペクトルが、この帯域に属する振動成分である。これらわずかながら周期を異にする各スペクトルが、同一の津波中に同一場所で重複して現れることが無い点から、これらは全て同種の波動であると考えられる。この波動は、釧路から根室半島に至る海岸を除く、主として弧状海岸全域にわたる広い範囲で発達している。振動パターンはエッジ波の特徴を有している。波高の最高地点は、襟裳岬の少し西に位置するえりも港付近に生じ、15.7cm に達している。最低地点は音別付近で、-12.2cm である。同一の周期であるにもかかわらず、苫小牧付近で波長が短くなっているのは、海底勾配が十勝側に比べ大きいためである。また、日高門別から浦河にかけての海岸は、いわゆる前浜がほとんど無い海域で、海岸線近くまで沖合いの水深の大きい海底が続いているため、波高が増大しないと考えられる。特徴としては、襟裳岬を回り込む形で日高、十勝両海岸にわたって、同位相の振動域が広がっている点が注目される。

3) 56.7min 周期成分波

図-5(3)に、津波発生後 156min の時点における波高分布を示す。実測津波では、この周期の範囲内に、53.4、53.6、54.6、56.7min などのスペクトルが検出されている。図中の波高最高値は 29.1cm、最低値は -20.3cm となっている。この波動もエッジ波のパターンを呈しており、日高側では苫小牧から襟裳岬の間が 2 波長、十勝側海岸では厚岸湾から襟裳岬の間が同じく 2 波長に相当する距離となっている。しかし、静内から浦河にかけてと、襟裳岬から広尾にかけての海域では、波高が殆ど増大していない。地形的特徴から判断すると、前者では、2) で述べたと同じく海底勾配の急峻さが、また後者では海岸に近い海底部の水深が、広尾以北に比べて約 3 倍の急勾配を持つためと考えられる。この波動成分では、襟裳岬が明確な振動の節となっている。

4) 46.4min 周期成分波

図-5(4)に、津波発生後 204min の時点における成分波の波高分布を示す。実測津波では、この帯域の範囲内に、46.4、46.7、47.8min のスペクトルが検出される。これらのスペクトルも同一地点で同一津波中に並存することが無いので、同種の振動によると考えて良い。この時点の波高最高値は 37.6cm、最低値は -20.8cm である。この振動パターンもエッジ波の励起を示しており、日高側では苫小牧の東約 26km に位置する鵜川から襟裳岬の間に 2 波長、十勝側では襟裳岬から根室半島先端までの間に 4.5 波長に相当する振動が生じている。しかし、釧路以東の海域ではあまり発達せず、特に釧路から厚岸湾口にかけて連なる岩石海岸では、急峻な海岸勾配がそのまま沖合いまで続くために、この周期のエッジ波の成立条件を欠いていると考えられる。

5) 39.2min 周期成分波

図-5(5)に、津波発生後 226min の時点における成分波の波高分布を示す。実測津波では、この周期の範囲内に、38.1-38.4min のスペクトルが検出されている。これらのスペクトルも、同一地点で同一津波中に共存することが無く、いずれも同一振動と考えて良い。この時点の波高最高値は 38.6cm、最低値は -24.6cm である。この波動も明らかにエッジ波のパターンを呈している。しかし主たる発達海域は十勝側の海岸であり、

日高側では苫小牧・厚賀間 55km と浦河・襟裳岬間 47km に生じるのみである。十勝側では襟裳岬から釧路にかけての海域に 3.5 波長、日高側苫小牧の海域で 2 波長分の発達を確認される。苫小牧の海域では波長が短いのが特徴的である。

6) 31.8min 周期成分波

図-5(6)に、津波発生後 178min の成分波の波高分布を示す。実測津波では、この周期の範囲に、30.6min と 31.6-32.0min のスペクトルが検出されている。1968 年十勝沖地震津波の釧路における記録からも、これら二つのスペクトルが共に検出されているので、これらは明らかに別種の波動によるものである。この時点の波高最高値は 45.4cm、最低値は -53.7cm である。図中にも明らかに 2 種類の異なる振動パターンが現れている。日高海域と釧路以東ではエッジ波のパターンを呈しているが、広尾から釧路にかけての海域では、2 次のモードの陸棚セイシュのパターンを示している。この陸棚セイシュは、1) で述べた周期 94.5min の陸棚セイシュの、2 次モード周期 31.5min に一致しており、一方 30.6min はエッジ波の周期である。

7) 28.3min 周期成分波

図-5(7)に、津波発生後 162min 時点の波高分布を示す。実測津波では、この周期の範囲に、29.3min と 27.3min のスペクトルが検出されている。これら二つのスペクトルが共存して検出された津波が 3 例あるので、これらは別種の波動によるものと判断される。ただし、両者が近接した周期を持ち、この解析で用いている個数 100-150 個程度の数値フィルターでは、両者の明確な分離が不可能なため、フィルターによる分離は行わなかった。従って、図-5(7)の等高線パターンは、両者の重ね合わせによる、見かけ上の波動を示すものである。この時点の波高最高値は 58.7cm、最低値は -61.9cm である。図から判るとおり、場所によって様々な形態の波動が出現している。苫小牧以西では登別付近までの海域に 1 波長のエッジ波が成立している。苫小牧から門別にかけては、2 次モードのエッジ波が 1 波長分形成されている。浦河から襟裳岬を經由して広尾付近までにもエッジ波が見られるが、そのパターンは基本波と 2 次波の中間的な様相を呈している。また、十勝弧状海岸の大部分では、2 次モードの陸棚セイシュあるいは半波長分の 2 次のエッジ波どちらも解釈可能な波動パターンとなっている。釧路以東は殆ど静穏である。

8) 24.3min 周期成分波

図-5(8)に、津波発生後 168min 時点の波高分布を示す。実測津波では、この周期の範囲に 24.7min のスペクトルが検出されている。釧路以東の海域には基本モードのエッジ波が生じている。一方、胆振、日高、十勝海域には 2 次モードのエッジ波が発生している。

9) 18.2min 周期成分波

図-5(9)に、津波発生後 246min 時点の波高分布を示す。この図では、十勝弧状海岸部に生じた 3 次の陸棚セイシュが見られる。これは基本波 94.5min のモード 3 の 18.9min 周期波に対応する。大津付近と広尾海域では位相が反転しているように見えるほか、襟裳岬先端海域では 2 次のエッジ波状の波動が生じている。この時点での波高最高値は 36.8cm、最低値は -29.7cm である。日高海域では殆ど有意な波動が認められない。

4. エッジ波の分散関係

本シミュレーションによって得られた、陸棚セイシュ以外の波動が、エッジ波であることを確認するため、図上から各周期波動の波長を測定し、エッジ波の分散関係と照合した結果を図-6 と図-7 に示す。なお、波長の測定が困難な 18.2min の波は省いた。少なくとも周期 24.3min よりも長いエッジ波は、各モード共分散関係を十分満足しており、これらの波動がエッジ波であると結論できる。ここでは示さなかったが、等高線パターンの時間的変化を調べた結果では、これらのエッジ波はいずれも進行性の波ではなく、定在波に近いものであり、振動の腹に当たる海岸では、津波の規模によっては、波高が著しく増大する危険性も考えられ、防災上の見地からも、今後より詳細な解析を行う必要がある。

5. 結論

1968 年十勝沖地震津波の波源モデルに基づく津波シミュレーションを行い、北海道太平洋沿岸の固有振動を

計算した。当該全域において、周期 63.7min から 18.2min の間に多くの定在エッジ波が発生した。また、従来予測されていた陸棚セイシュが、胆振、十勝両弧状海域で確認された。十勝海域では、2次と3次モードのセイシュも再現された。

参考文献

[1] 高橋 将・八鍬 功. 北海道太平洋岸の津波スペクトルにみられる特徴について. 自然災害資料解析, 9, pp. 27-36, 1982.

[2] Ormsby J.F.A., Design of numerical filters with applications to missile data processing. J. Assoc. Computing Machinery, July, pp. 440-466, 1961.

[3] Takahashi S. and I. Yakuwa, Tsunami Response of the Tsugaru Straits. Proc. Int. Tsunami Sympo.. pp. 315-327, 1981.

[4] Aida I., Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters. J. Phys. Earth, 26, pp. 57-73, 1978.

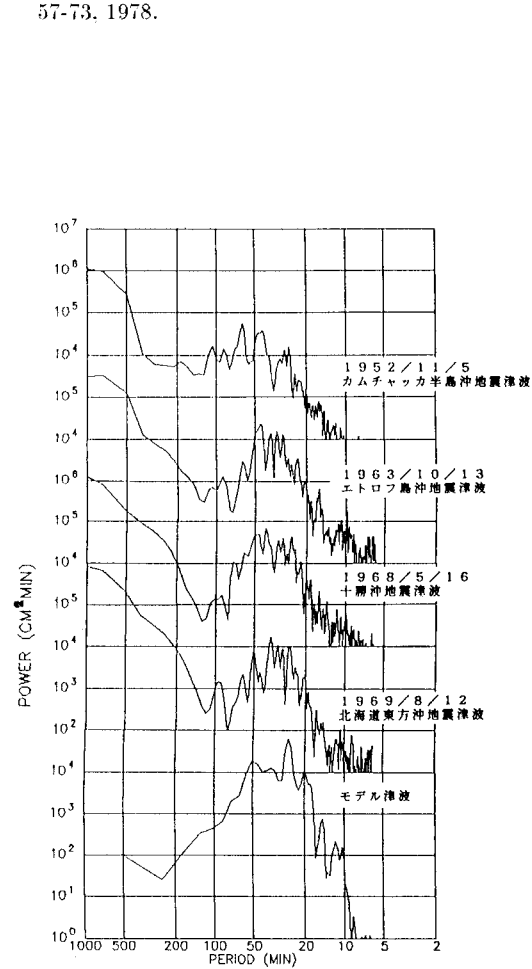


図-1 津波スペクトルの例（釧路港）

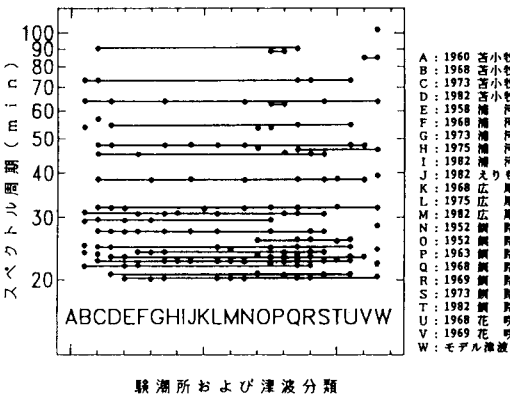


図-2 各津波の主要な出現スペクトル

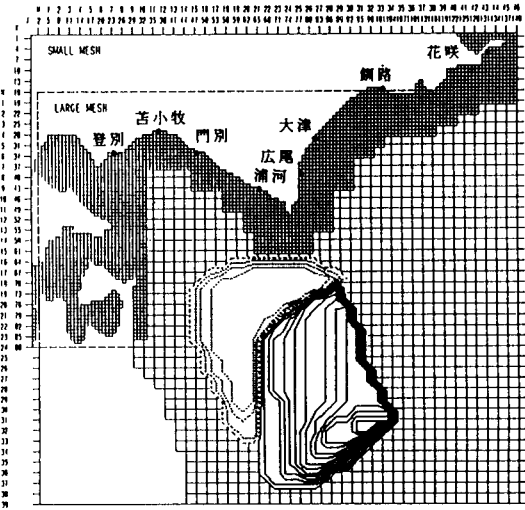


図-3 計算領域とモデル津波の初期変位

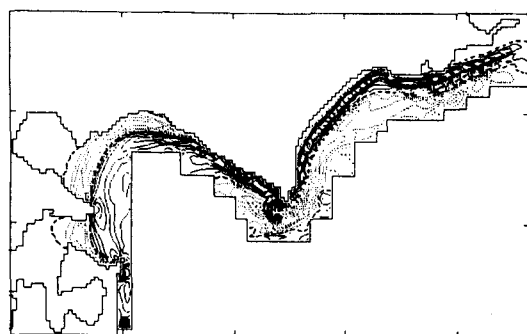


図-4 モデル津波の伝播（発生後40分）

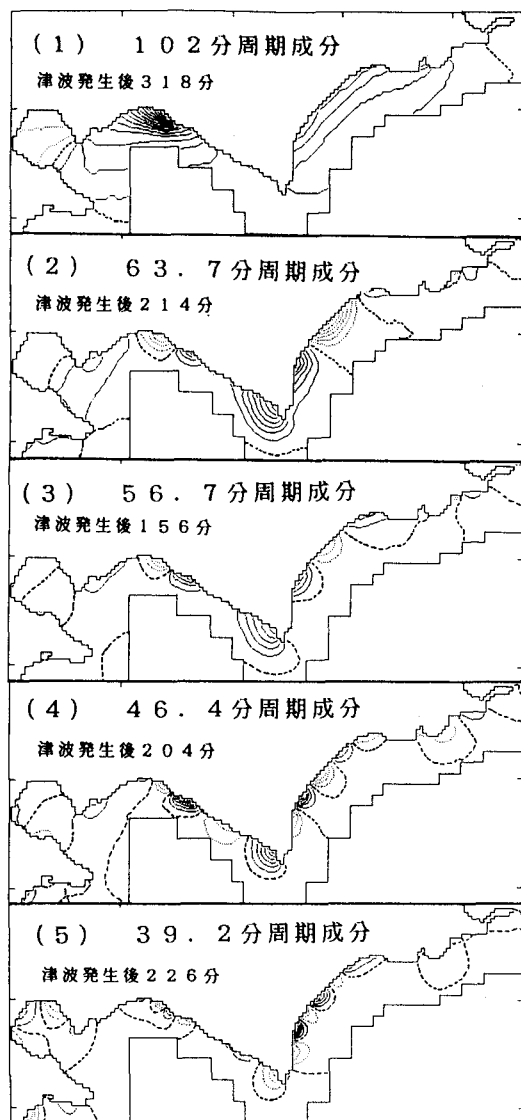


図-5 成分波の波高分布

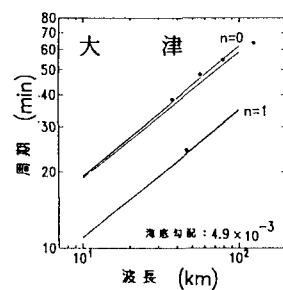
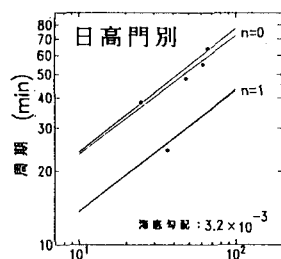
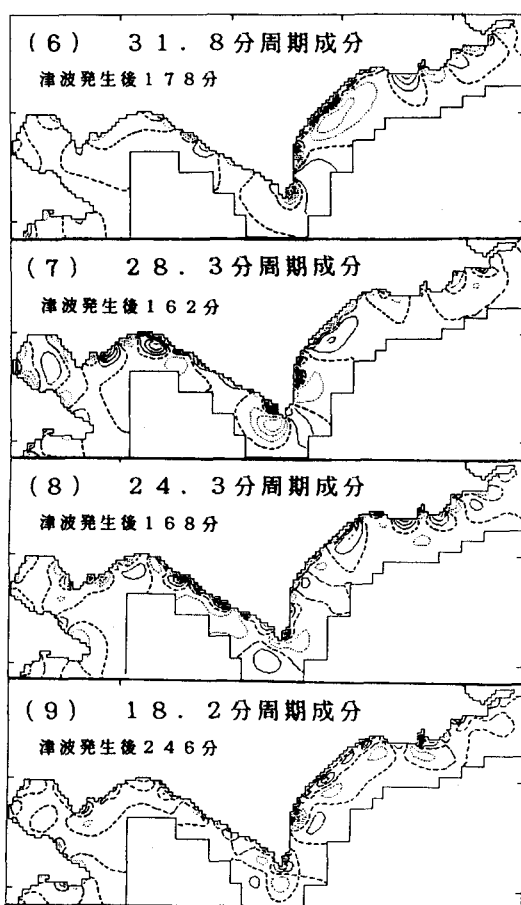


図-6 エッジ波の分散関係