

台風に伴う波浪と長周期変動

笠井 雅 広*・佐藤 慎 司**

1. はじめに

浅海域で発達する長周期波は、海岸災害の要因の一つであることが近年指摘され、その発達、伝播機構に関する研究が進められてきた。越波問題については、短周期波の波浪成分、長周期水位変動成分および潮位との位相関係に依存して発生するものであり、侵食問題については、通常の波浪による強い底面摩擦力の作用で移動しやすくなった底質が、長周期波などによる流れの影響を受けて輸送されると考えられるため、工学的には短周期波の包絡波と長周期変動成分との位相関係が重要となる。これらの海岸災害は、主に砕波帯内で発生するものであるが、短周期包絡波と長周期波の位相関係などの諸特性は砕波帯外での条件に大きく依存するため、冬期季節風や台風などの気象条件ごとに長周期変動の発達特性を解明する必要がある。本研究では、台風 9718 号、9719 号、9720 号の接近・通過を含む期間に、東海地方から北海道に至る太平洋沿岸の 4 海岸において砕波対外で観測された海象データをもとに、台風の経路、観測地点の違いによる長周期変動成分の発達特性の違いを明らかにすることを目的とした。

2. 現地データの概要

図-1 は、本研究でデータ解析の対象とした台風 9718 号、9719 号、9720 号の経路、中心気圧の変化およびデータの計測地点を示したものである。9718 号と 9720 号は太平洋上を北上した後、進路を変え日本列島に沿うように北東へと進んだ。台風 9719 号は太平洋を北上して九州地方に上陸し、日本海へ抜けたのち温帯低気圧に変わった。

図-1 に示した 4 つの観測地点においては、波、流れ、風速および気圧などが計測されている。白老地先の観測地点においては連続観測が実施されており、データが時間間隔 0.5 s で記録されている。その他の観測地点には自記式波浪流速計が設置されており、毎正時または毎偶

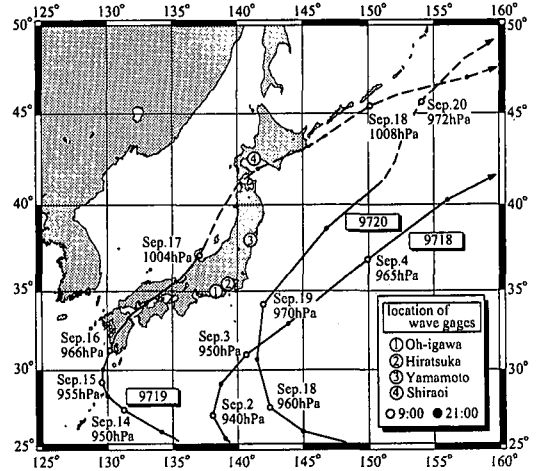


図-1 台風の経路と観測地点

表-1 観測条件

観測地点	水深	計測項目	計測間隔
①大井川	24.7 m	ρ, η, u, v, T	毎正時
②平塚	20.0 m	η, u, v, T	毎正時
③山元	14.8 m	ρ, η, u, v, T	毎偶数時
④白老	17.0 m	η, u, v, \bar{W}, T	連続

数時をはさむ 20 分間のデータが時間間隔 0.5 s または 0.3 s で記録されている。波浪流速計はいずれも海底上約 1 m の位置に設置されている。それぞれの地点における水深、計測項目、計測時間間隔は表-1 に示す通りである。

3. 波浪場の経時変化

図-2~4 は 9 月 1 日から 25 日の大井川、平塚、白老のデータを示したものであり、上から順に平均水位 $\bar{\eta}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ 、平均波向ベクトル $\bar{H}_{1/3}$ 、平均流速ベクトル \bar{U} である。台風 9718 号、9719 号、9720 号の影響期間を最上段に示してある。また、下段には長周期変動成分の統計量を示した。本研究ではスペクトル解析の結果から、周期 30 s 以上の変動成分を長周期変動成

* 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室

** 正会員 工博 東京大学助教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

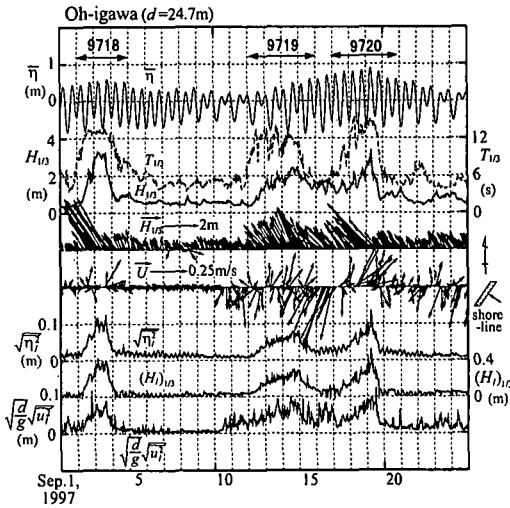


図-2 大井川地先における波, 流れの経時変化

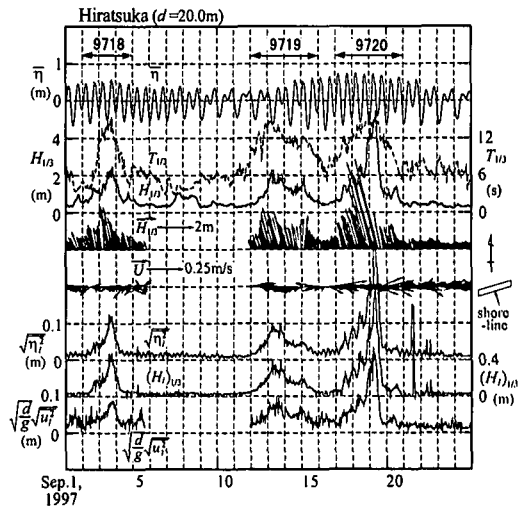


図-3 平塚地先における波, 流れの経時変化

分とした。平均波向方向の水粒子速度を u , それに直行する方向の流速を v として, 数値フィルターにより周期 30 s 以上の変動成分を抽出し, 長周期成分とした。上から水位の rms 値 $\sqrt{\eta^2}$, 長周期波の有義波高 $(H_{1/3})_{LP}$, 平均波向方向の水粒子速度の rms 値 $\sqrt{u^2}$ である。大井川, 平塚における各台風の影響期間の有義波高 $H_{1/3}$ と長周期水位変動成分の rms 値 $\sqrt{\eta^2}$ を比較すると, いずれの時化においても有義波高と $\sqrt{\eta^2}$ の変動はほぼ対応しており, 波浪の発達に伴って長周期変動成分も発達していることがわかる。同期間中最高の有義波高は, 平塚地先で台風 9720 号が最接近した 9 月 19 日 7:00 に $H_{1/3}=4.5\text{ m}$ が観測されており, 長周期変動も同時刻のものが大きい。東海・関東地方沿岸の 2 海岸においては, 台風の接近と波浪の発達が明瞭に対応している。一方, 白老や山元のデータでは台風の最接近時に必ずしも波浪がピークとならない場合があり, 風域が比較的遠い東北・北海道地方の沿岸では, 波浪の発達に対して, 遠く離れた風域からの影響と, 温帯低気圧などによる局所的な風場による影響とが同程度に重合していると考えられる。

4. スペクトル形状の変化

図-5(a)~(d) には白老地先における 9 月 17 日から 18 日の水位と平均波向方向の流速のパワースペクトル密度を示した。図には比較のため同波高条件に対する Bretschneider-光易スペクトルも示してある。図-5(a) は有義波高がピークを示した 9 月 17 日 10:50 から 4096 秒間のパワースペクトル密度である。水位変動は $f=0.12\text{ s}^{-1}$ 付近にピークがある。16 日午後から 17 日午前にかけて白老地先では継続して 10 m/s 前後の南東風が観測されていることから, この波は観測点近海で生成

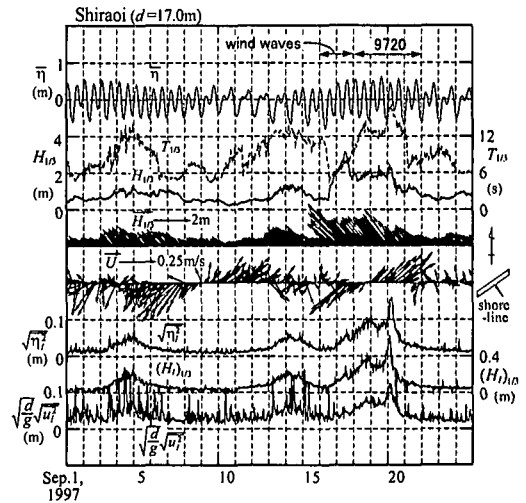


図-4 白老地先における波, 流れの経時変化

されたものであると考えられる。また, $f < 0.03\text{ s}^{-1}$ の長周期側のエネルギーは低い。図-5(b) は (a) の 10 時間後のパワースペクトルである。 $f=0.12\text{ s}^{-1}$ に加えて $f=0.06\text{ s}^{-1}$ 付近にもう一つのピークが現れており, 異なる 2 つの風域で発生した波が来襲していることが予想される。 $f=0.06\text{ s}^{-1}$ 付近のピークは沖合いの風域で生成されたものと考えられる。図-5(c) は台風 9720 号が最接近した 9 月 19 日 20:50 から 4096 秒間のパワースペクトルであり, $f=0.07\text{ s}^{-1}$ 付近に単一のピークを持つ形状となっている。 $f=0.12\text{ s}^{-1}$ 付近にあったピークはほとんど見られず, また $f < 0.03\text{ s}^{-1}$ 以下の長周期成分領域のエネルギーが発達している。図-5(d) は長周期変動の最も発達した 9 月 20 日 2:50 から 4096 秒間のパワースペク

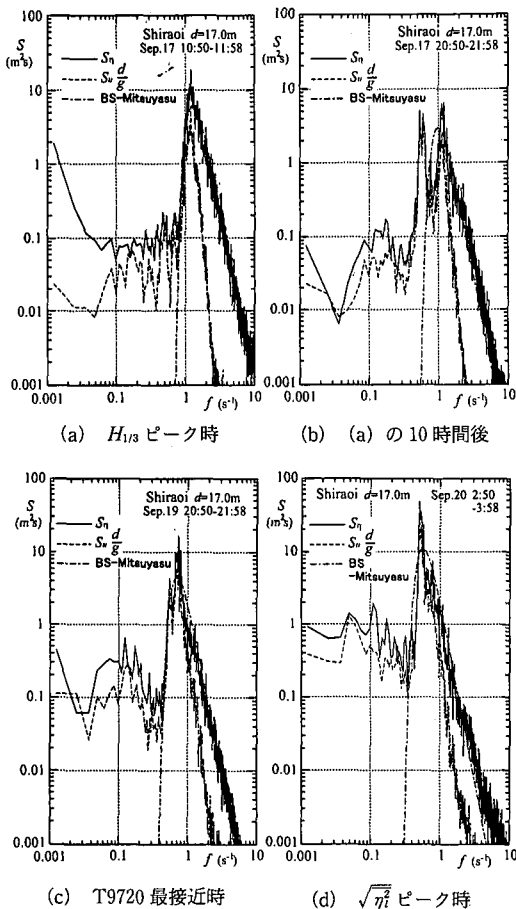


図-5 水位、流速のパワースペクトル

トルである。f=0.05 s⁻¹付近のピーク周辺にエネルギーが集中してスペクトル形の尖鋭度が増し、f<0.03 s⁻¹の長周期変動領域のエネルギーもさらに増大している。このように、台風の移動に伴う波浪の発達によりスペクトル形状が変化し、それに応じて長周期波の発達特性も大きく変化していることがわかる。スペクトル形状のみでなく、GF, γ_{HH}, \bar{h} などの波群パラメータについても、長周期変動の発達と強い相関が確認された。

5. 長周期変動成分の発達特性

(1) 長周期変動の振幅と短周期波波高の関係

図-6(a)~(c)は大井川地先、平塚地先および白老地先における長周期水位変動の rms 値と有義波高の関係を示したものである。大井川地先、平塚地先については台風 9718, 9719, 9720 号の影響期間を、白老地先については台風 9720 号の影響期間とその直前の風波が発達した期間を抜き出し、期間ごとに記号を変えてプロットした。

中谷ら (1998) は、鹿島灘沿岸において取得した台風

9718 号の接近通過時の長時間連続観測データを解析し、波高が高い条件では長周期波は風波の包絡波形の 1 乗に比例して増幅することを示した。

図-6(a)の大井川地先のデータを見ると、有義波高が 1 m 以上の場合、長周期水位変動成分の rms 値は 3 つの台風とも同様に、有義波高に比例して増幅している。図-6(b)は平塚地先のデータである。1 m ≤ H_{1/3} ≤ 3 m の場合には、大井川地先と同様に長周期水位変動成分の rms 値と有義波高の間には線形的な関係が認められる一方、台風 9720 号の影響 (□印) により有義波高が 3 m 以上に発達した場合、実測値のばらつきが大きくなる。図-6(c)は白老地先のデータである。○印が風波性の波が来襲している期間であり、□印が台風の影響による波が来襲している期間である。両期間とも長周期水位変動成分の rms 値は有義波高と比例関係にあるが、比例定数の値は大きく異なっている。

二次的非線形干渉によって発達する長周期波については、Tick (1963), 浜田(1964), 多方向波に対しては Sand (1982), 木村(1985)らが理論式を導いている。佐藤(1997)は木村 (1985) の理論を用いて単一方向進行波の仮定のもとに数値計算を実施し、無次元長周期変動成分と無次元水深に関する以下の帰帰式を導いている。

$$\frac{\sqrt{\eta_i}}{H_{1/3}/L_0} = 0.5 \left(\frac{\sigma^2 d}{g} \right)^{-2.2} + 0.04 \left(\frac{\sigma^2 d}{g} \right)^{-0.2} \dots (1)$$

ここで σ(=2π/T_{1/3})は有義波周期に対する角周波数である。

図-6(a)~(c)中の実線は (1) 式である。佐藤 (1997) の計算では日本海沿岸を解析対象としたため、T_{1/3}は 10 s までしか対象とされていないが、今回のデータに見られる T_{1/3}=15 s 程度の条件においても数値計算を実施し、(1) 式が成立することを確認した。図-6(b)において、有義波高が 3 m 以上の場合の長周期水位変動成分の発達は有義波周期を 15 s とした場合の (1) 式と比較的良好一致を示していることがわかる。図-6(b)で有義波高が 3 m 以上となったのは、台風 9720 号の影響による波浪のピーク時であり、図-3 よりこの時の有義波周期は 15 s 程度であった。つまり平塚地先において台風などの影響により有義波高が 3 m 以上に発達するような場合は、長周期変動成分のうち二次的非線形干渉による拘束波成分が卓越し、その結果、長周期水位変動成分は有義波高の 2 乗に比例して増幅するような、非線形的な増幅機構が介在する。一方、有義波高が 3 m 以下の場合には長周期変動成分のうち自由波成分が卓越し、長周期変動成分は有義波高の 1 乗に比例して増幅していると考えられる。

(2) 台風の接近による拘束波の発達

図-7(b)は大井川地先において実測された、台風 9720

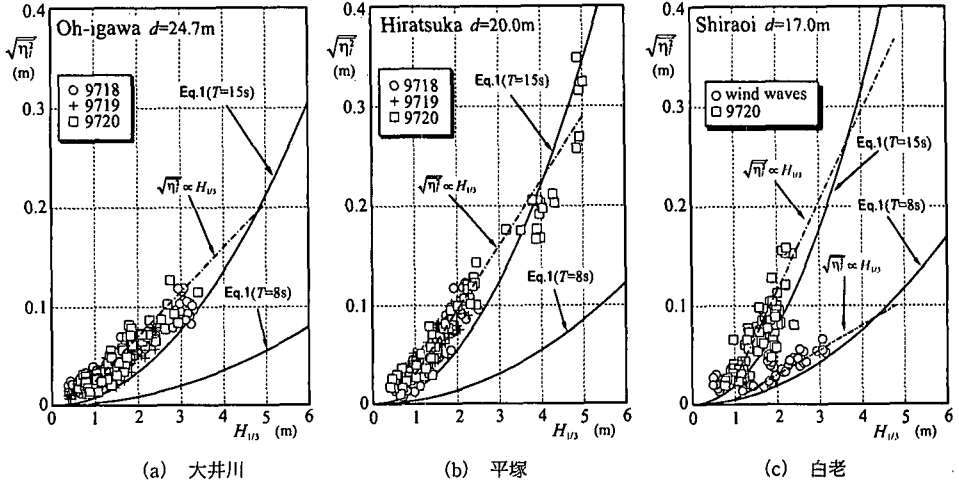


図-6 有義波高と長周期水位変動の関係

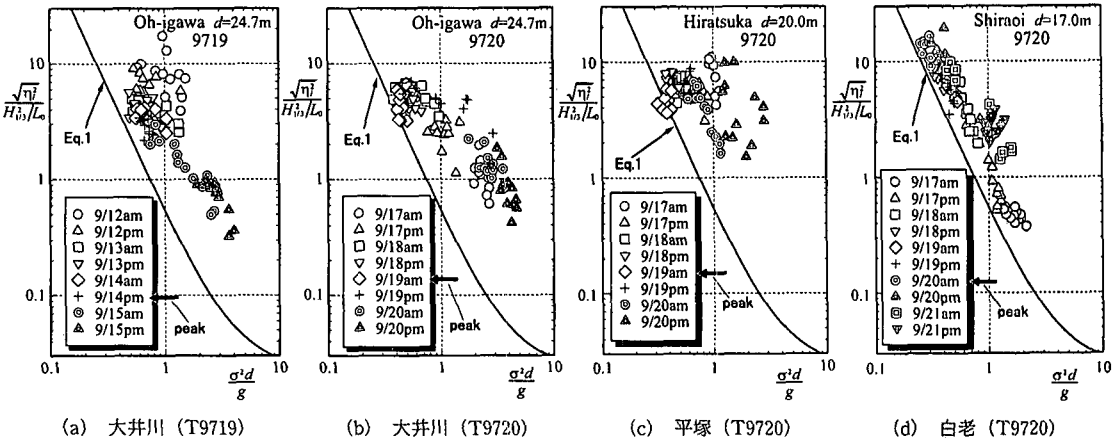


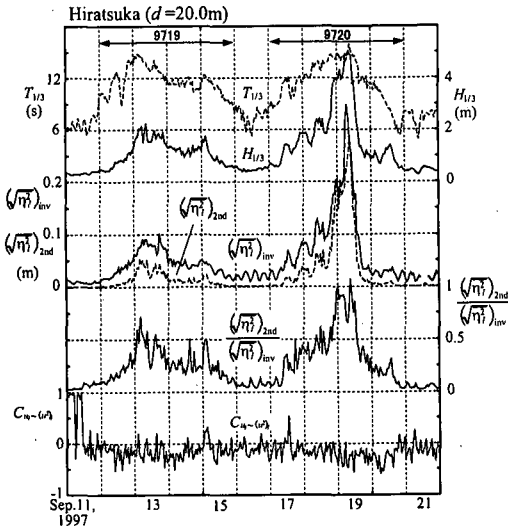
図-7 無次元水深と長周期水位変動の関係

号の影響期間の無次元長周期水位変動の振幅と無次元水深との関係を、6時間ごとに記号を変えてプロットしたものである。また図中の実線は(1)式を表す。台風9720号の影響によるうねりが来襲し始めると、実測値の無次元水深は徐々に減少(有義波周期は増加)し、それに伴って長周期水位変動成分の無次元振幅は徐々に増加する。この間の時化の発達期(図中の○→□)においては実測値の長周期水位変動の振幅は常に(1)式より大きな値を示しているが、ピーク付近(図中の▽→◇)に近づくると無次元水深の減少は頭打ちになり、長周期水位変動の振幅は減少して(1)式に近づいている。ピークが過ぎると発達時とほぼ逆の経路(図中の+→△)をとる。大井川地先においては台風9718号による時化時にも同様の傾向が見られる。このことは、これら2つの台風における時化の発達、減衰期では拘束波に比較して大きな割合の自由波が存在するのに比べ、ピーク時には拘束波に

よる長周期変動成分が卓越することを示している。一方、図-7(a)に示した同地点の台風9719号においては、波浪のピーク時においても回帰式に対して実測値の方が大きな値を示している。台風9719号による時化時には9718号、9720号の場合と異なり、短周期波浪のピーク時にも自由波の割合が高かったものと推察される。

図-7(c), (d)はそれぞれ平塚、白老における台風9720号の影響期間を示したものである。平塚ではピーク時には、拘束波が卓越しているのに対し、白老ではピーク時においても自由波が卓越する結果となっている。これは白老地先に対しては、9720号は800 km 遠方を通過したこと、そのために波浪成分が十分に発達しなかったことが原因と考えられる。

このように長周期波の発達特性は台風経路の影響を強く受け、一般に風域が近く、波高が十分に発達する場所では拘束波が卓越する一方、波浪の伝播距離が非常に長



図一八 実測の長周期水位変動成分と理論値の比較

い場合には伝播途中に自由波成分を多く含むようになると考えられる。

(3) 自由波と拘束波の割合

高波浪が来襲する期間における自由波と拘束波の割合を検討するため、計測データより抽出した短周期の包絡波に対して、2次干渉理論により非線形干渉波を計算し、実測値の長周期水位変動成分との比較を行った。図一八に平塚地先における台風9719号および9720号の影響を含む期間のデータと計算結果の比較を示した。計算は平塚地先における毎正時前後1229秒間の水位データについて、FFTにより各成分波の位相と振幅を求め、各周波数の差の成分波を重ね合わせるにより二次干渉波を算定した。ただし、短周期波の方向分散性は考慮せず、単一方向進行波として取り扱った。

図一八は、上から有義波周期 $T_{1/3}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ 、実測値の長周期水位変動成分の rms 値 $(\sqrt{\eta^2})_{inv}$ 、二次干渉理論による理論波形の rms 値 $(\sqrt{\eta^2})_{2nd}$ 、理論値と実測値の割合 $(\sqrt{\eta^2})_{2nd}/(\sqrt{\eta^2})_{inv}$ 、包絡波形と長周期流速変動との相関係数 $C_{u-(u^2)}$ を示している。理論値の振幅は、短周期波のピーク付近では、実測値の70%以上の値を示しており、拘束波成分が卓越していることがわかる。このことは、同期間に包絡波形と長周期流速変動との相関係数が負の値を示していることから裏付けられる。9719号の影響期間やその他の高波浪が来襲していない期間については実測値に比べて理論値の値は小さく、長周期変動には自由波によるものが多く含まれると考えられる。図一八

に示す台風9720号波浪ピーク付近では、理論値は実測値の70%(約 $1/\sqrt{2}$ 倍)程度の値となっていることから、同台風の波浪最盛期には、拘束波と(海岸からの反射波を含めた)自由波のエネルギーはほぼ同程度であったと考えられる。

6. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

1. 長周期水位変動成分の振幅は、有義波高が3m以下の条件では有義波高の1乗に比例して発達する。比例定数は風域の特性や風域までの距離によって変化する。
2. 台風による長周期変動成分の発達特性は、観測地点と台風の風域との距離に大きく依存し、観測地点に対し風域が近く、短周期の波浪が十分に発達する場合には、二次の非線形干渉波による長周期変動成分が卓越するが、風域からの距離が遠く伝播距離が長い場合には、短周期波浪は十分発達せず、自由波の割合が増大する。
3. 長周期水位変動成分の実測値と理論値を比較した結果、台風のピーク時における長周期水位変動成分の振幅は、理論値が実測値の70%以上であった。

謝辞：本研究で解析した平塚地先のデータは、科学技術庁防災科学研究所より、大井川、山元、白老地先のデータは建設省各工事事務所より提供いただいた。貴重なデータを提供いただいた関係各位に謝意を表す。

参考文献

木村 晃(1985): 非線形長周期波の2次元スペクトル, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 154-158.
 合田良実(1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻第3号, pp. 72-82.
 佐藤慎司(1997): 浅海域における長周期流速変動の発達特性, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 256-260.
 鈴木康正・河合弘泰・望月徳雄・松森孝弘(1994): スペクトル形状による波群特性の変化, 港湾技術研究所報告, 第33巻第2号, pp. 7-22.
 中谷耕一・寛田博章・水口 優(1998): 長時間連続現地観測データにおける長周期波と波群の特性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 291-295.
 浜田徳一(1964): 表面波の2次干渉, 第11回海岸工学講演会論文集, pp. 12-18.
 Sand, S. E. (1982): Long waves in directional seas, Coastal Engrg., Vol. 6, pp. 195-208.
 Tick, L. J. (1963): Nonlinear probability models of ocean waves, Ocean Wave Spectra, Prntice Hall, pp. 163-169.