

太平洋沿岸域における海上風と風波の変動特性 に関する研究

STUDY ON TIME VARIATIONS OF WINDS AND WAVES OBSERVED ON PACIFIC COAST

水谷法美¹・細川顕司²

Norimi MIZUTANI and Kenji HOSOKAWA

¹正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科地圏環境工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 大林組神戸支店土木事業部工事課 (〒651-0084 神戸市中央区磯辺通3-1-7)

This paper is intended to investigate the spectral characteristics of sea winds and wind waves on the Pacific coast. Time variations of the significant wave heights and periods have been also discussed in relation with time variations of sea winds in order to investigate mechanism of the growth of the wind waves. In the initial stage of the wind wave, high frequency components grow up and then the lower frequency components are developed. The linear relationship between the significant wave height and wind intensity has been confirmed for the swell propagating from far field. The boomerang-like distribution has been found in the relationship between the significant wave height and period.

Key Words : sea winds, wind waves, significant wave height, significant wave period, low pressure

1. はじめに

沿岸域を波浪災害から守るために数多くの事業が実施されてきており、護岸や海岸堤防などの海岸構造物も多く建設されてきた。これらの構造物は暴浪時を対象とした設計波のような代表波によって設計されるが、一方、海浜変形侵食など比較的長時間の波浪応答を考える場合には、暴浪時のような厳しい波浪条件でなくとも作用時間が長い場合にはその影響は大きい。しかし、長時間の波作用を考える場合、波の持つ非定常性も波の重要な性質であり、その影響を考慮することは重要である。通常、我々が海洋波として扱うのは、風によって生起する風波である。したがって、波の非定常性を考慮した波浪外力を考えるためには、気象要因と関連づけながら風と波浪の相関を解明しておくことが重要であると考えられる。

現在までに、波の発生と発達に関する研究は数多く行われてきた。例えばMitsuyasu¹⁾の実験的解析によると、発達過程にある風波のスペクトル形はほぼ相似形であり、スペクトルピークの発達は主として低周波側に向かって生じ、波の発達にともなってスペクトルのピークが低周波側へ移行しながら全体的なエネルギーの増大が生じることが確認されている。

また、高山ら²⁾は、実際の海域では双峯型スペクトル波が多く発生し、このうち低周波側のピークは外洋からのうねりであり、高周波側のピークは現場海域の風による風波であることを確認している。

一方、水谷ら³⁾は、和歌山県白浜海岸における風と波の観測資料の解析から、日本近海の太平洋沖に低気圧が存在しないとき、風速と有義波高は傾きがほぼ0.02の線形関係にあることを示している。また、高山らと同様に、波浪におけるうねりと現場海域の風による風波の二重構造を指摘している。しかし、水谷ら³⁾の研究は一地点のみを対象としており、そこで見いだされた特性が一般的な特性であるかどうか検討の余地が残されている。そこで、本研究では、波浪の発達的主要因素である海上風と波浪の相互関係の解明を目的に、太平洋沿岸の静岡県遠州灘海岸で実測された風と波浪の時間変動記録を使って、風と波浪の周波数特性を議論し、風速と有義波高と有義波周期の関係を、気象要因と関連づけながら考究する事を目的とする。

2. 観測データと解析方法

本研究で使用する風と波の観測資料は、静岡県遠

州灘に面した海岸に設置された風速計とその前面海域に設置された波高計により計測されたものである。このうち、風速（地上20m）はプロペラ型風向風速計により、また、水位変動は超音波式波高計によりそれぞれ計測されており、それらの観測値は時間間隔0.5秒で20分間のデータが連続的に記録されている。

観測期間は2001年2月27日～2002年1月31日であるが、2001年5月1日～2001年10月25日及び2001年12月29日～2002年1月4日は欠測であったため、それ以外の期間を解析の対象とした。

解析では、水位の時間変動記録にゼロアップクロス法を採用し個々の波の波高と周期を定義し、波別解析法により有義波高と有義波周期を計算した。

また、風速の絶対値及び水面変動の時間変動記録にFFT法を用いてパワースペクトルを計算した。な

お、一つのデータセットには、0.5秒間隔で20分間計測された値2400個が含まれているため、このうちの2048個のデータを使用した。また、スペクトルの平滑化については、Parzenのウィンドウを用い、そのバンド幅を0.01Hzとした⁴⁾。

3. 風と波の周波数特性

図-1に、風の発達過程にある11月30日の風のパワースペクトルを示す。白浜観測値に見られたように^{3), 4)}、0.01～0.02Hzの低周波帯のエネルギーがそれよりも高周波帯のエネルギーに比べてオーダーが大きいことが確認できる。また、図中の同日6時と8時のスペクトルにみられるように、風速が大きい状態では、0.02Hz以上の高周波帯では乱流スペクトルに見られる $f^{-5/3}$ 乗にしたがって減少する傾向が確認できる。これは白浜で観測された風と同様である³⁾。

風の発達過程においては、パワースペクトルはまず低周波帯(図-1では0.004Hz以下)が発達し、その後、高周波帯が追いかけるように成長し、スペクトル全体が滑らかになっていく様子が確認される。したがって、風はその発達過程において、まず長周期の変動成分が現れ、その後、短周期の成分のエネルギーが成長するものと考えられる。これは乱流のスペクトルに見られる傾向と類似している。一方、風の減衰過程では、風速の減少とともにスペクトル全体にわたって減少するが、図-2に例示するように、まず、高周波帯のエネルギーが減少し、ついで低周波帯のエネルギーが減少する傾向のあることが確認された。

図-3に、図-1に対応する日時の波のパワースペクトルを示す。水谷ら³⁾は白浜で観測された風と波の解析から、風の低周波成分のエネルギーが風波の発達と減衰に重要な寄与をなしている。これは、風の低周波帯のエネルギーが高周波帯のエネルギーに比べてオーダーが大きいことを考えると、太平洋に開いた遠州灘海岸における風と波の結果でも同様であると考えられる。波のパワースペクトルは、現場付近の風場の発達にともない、まず0.2Hz～0.3Hzの高周波側から発達している。そして、波のパワーが増加するにしたがってスペクトルのピークが低周波側へ移動している様子が確認できる。また、ピークより高周波側の領域では、 f^{-5} 則が成り立っていることが確認できる。また、11月30日は現場海域の風域が比較的大きく、吹送距離も大きいと考えられる状態であった。このような場合は、さらに高周波側で波のパワーが f^{-4} に比例する領域が表れる傾向も見られた。

4. 風域の変化に対する波浪の諸特性

来襲波の非定常性を考慮した外力特性を議論する

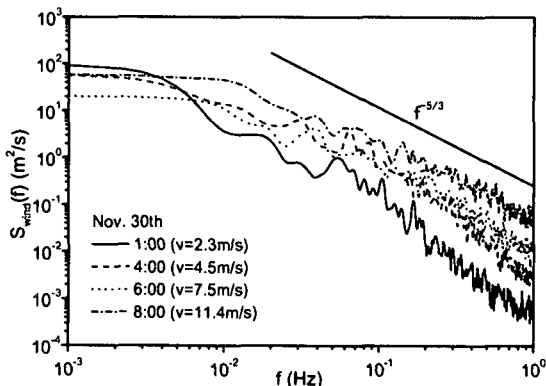


図-1 風のパワースペクトルの変化 (2001/11/30)

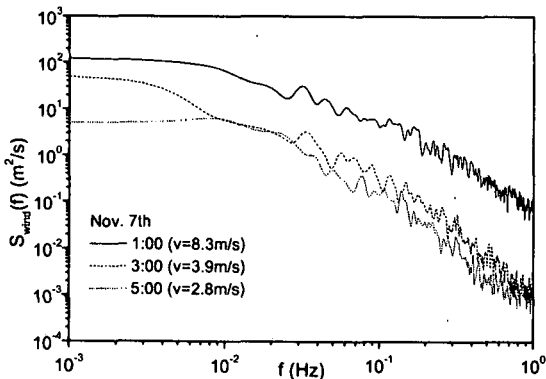


図-2 風のパワースペクトルの変化 (2001/11/7)

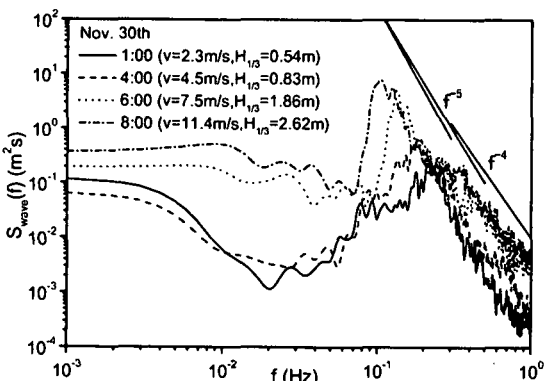


図-3 波のパワースペクトルの変化 (2001/11/30)

ためには、風域の特性、すなわち、気象要因と関連づけた風と波の特性を検討しておく必要がある。そこで、風と波の諸特性を気圧配置のパターンと関連づけながら考察する。

(1) 日本近域(北方)に風域が存在するとき

観測地点付近の気圧の変化が比較的大きく、風が強い状態の代表的な気圧配置として、日本近域、特に観測地点の北方に低気圧が存在する場合の風と波の変動特性を考える。

a) 11月25日の結果

このような気圧配置の例として、11月25日の結果を取り上げ、図-4に平均風速 v と有義波高 $H_{1/3}$ の関係の径時変化を、図-5に有義波周期 $T_{1/3}$ と有義波高 $H_{1/3}$ の関係の径時変化を示す。また、図-6と図-7に波のパワースペクトルの時間変化を示す。なお、図-4と図-5の数字は時刻を表している。図-4より、16時までは時間の経過とともに風速が徐々に増加し、それにもなって波高も増加していることが確認できる。また、11時までは風速と有義波高の間に傾きが0.02の線形関係が成り立っているが、その後風速ともなう有義波高の増大の割合は増加し、傾きは急になる。図-6と図-7から、風速の増大ともなってパワースペクトルの0.3Hz付近からパワーが増大し、10時頃からスペクトルの形状が双峯型となっている。この時間は波高の増加の割合が大きくなる時間とほぼ一致することから、パワースペクトルに見られる0.1Hz付近のピークは外洋からのうねりによる成分

であり、それより高周波側のピークは現場付近の風によって発達した波の成分であることが推察できる。そして、このスペクトルのピークは、その値が増大するとともに低周波側へ移っていく様子が確認できる。これは、Mitsuyasu¹⁾が発達期における波のスペクトルとした形とよく似ている。

なお、図-4で11時以降、波高と風速の関係が変化するが、図-6の10時のパワースペクトルを見ると、発達した高周波側のピーク値が低周波側のピークの値に近づいている。図示していないが、11時には高周波側のピーク値が低周波側のピーク値より大きくなっている。その後、傾きが0.02から外れている。このことから、現場付近の風によって高周波成分の波が発達するとき、この高周波成分のパワーが低周波成分の波のパワーより小さいときは風速と有義波高の間に傾きが0.02の線形関係が成り立つが、逆に低周波側のパワーを上回るようになると傾きが0.02から外れると考えられる。なお、図-4に見られるように、波が発達した後の減衰時にも風速との間に傾き0.02に近い割合で変化する場合が比較的多く見られた。

ところで、有義波周期は、図-5に示すように、風速(波高)の増加ともなって一度減少し、その後波高の増大とともに緩やかに増加する。このため、有義波周期と有義波高はブーメラン型の分布形状となっている。有義波周期が減少傾向にあるのは、この日の場合、11時までであり、これは、風速が小さい8時までの時間帯では、パワースペクトルのピー

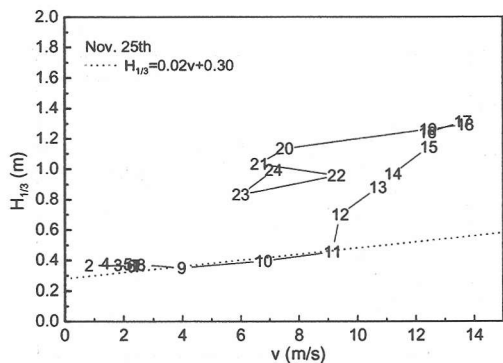


図-4 風速と有義波高の関係 (2001/11/25)

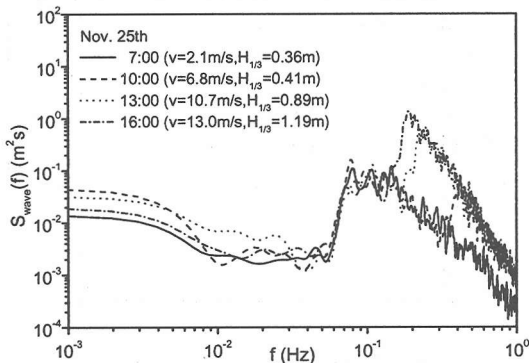


図-6 波のパワースペクトルの変化 (2001/11/25)

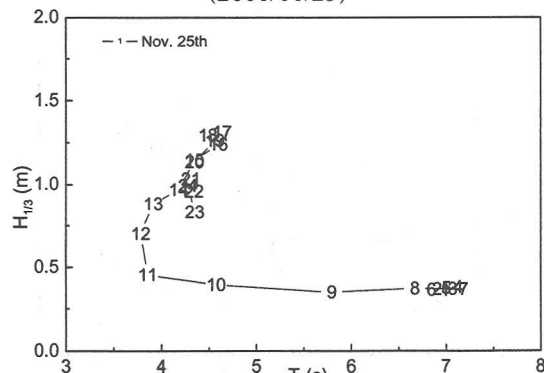


図-5 有義波周期と有義波高の関係 (2001/11/25)

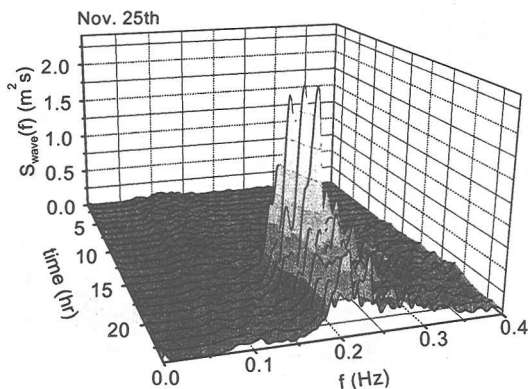


図-7 波のパワースペクトルの径時変化 (2001/11/25)

クは0.1Hz（周期10秒）付近であるが、9時以降風速が増加すると、パワースペクトルはまず周期が3~4秒の高周波側から発達するため、高周波成分の波の有義波高への寄与が相対的に大きくなり、有義波周期が一度減少する。一方、波高の増加に伴い有義波周期が増加傾向にあるのは12時から17時までとなっている。この時間帯では、うねりよりも風波が卓越し、しかもそのスペクトルのピーク周波数が波の発達とともに低周波側に移行しているため、有義波周期も増大したと考えられる。すなわち、風速が小さい時の有義波高は周期の大きいうねり成分に大きく依存するのに対し、風速が増加すると周期の短い風波が成長し有義波高に徐々に影響を及ぼすようになると考えられる。そして、時間の経過とともに風波がさらに発達し、有義波高に対する風波の影響が強くなるが、この風波の周期は発達するにしたがって長くなるため、風波のスペクトルのピークが低周波側に移動する。このため、有義波高の増大に伴い有義波周期が緩やかに増加するものと考えられる。

b) 3月27日の結果

上記と同様に、日本の北方に低気圧が存在し現場付近の風速が大きい状態であった3月27日の結果を図-8と図-9に示す。図-8は有義波高と有義波周期の関係を、図-9は波のパワースペクトルの径時変化を示したものである。

全体的に11月25日と同様の傾向が認められる。すなわち、風速が大きいため、0.25Hz付近の成分波が

発達し、パワースペクトルは双峰型となっている。図-5と図-8の有義波周期と有義波高の関係を比較すると、いずれもブーメラン型の分布となっているが、3月27日の方が全体的に右上へシフトした分布形状となっている。これは、図-7と図-9の比較より、3月27日の方が0.1Hz付近のパワーが大きいためであると考えられる。すなわち、うねりが大きい場合、そのエネルギーレベルを超えて風波の有義波高に及ぼす影響が支配的になるには、風波はより発達している必要があり、そのような状態では、風波のスペクトルのピーク周波数も低周波側に移動しており、風波の周期は長くなっていると考えられる。このため、うねりの影響が大きいときは、有義波周期と有義波高の関係が全体的に右上へシフトすると考えられる。また、図-5と比較すると時間的に逆の傾向を示しているが、これは図-9のスペクトルに見られるように、風波成分のピーク後に減衰してもうねり成分があまり減衰していないため、波高の減少とともに周期がうねりの周期に近づくことによると考えられる。

(2) 風域が日本近域(南方)を東進するとき

つぎに、太平洋沖を低気圧が東進し、観測地点付近に接近してくる場合を考える。ここでは、3月25日と3月26日の結果を取りあげて考察する。図-10~図-13に解析結果を示す。図-11と図-13から、3月25日の10時まで0.1Hz付近のパワースペクトルが発達し、それに伴い、有義波高と有義波周期が緩やかに線形的に増加している様子が確認できる。これは、東進している低気圧によるうねりが時間とともに発

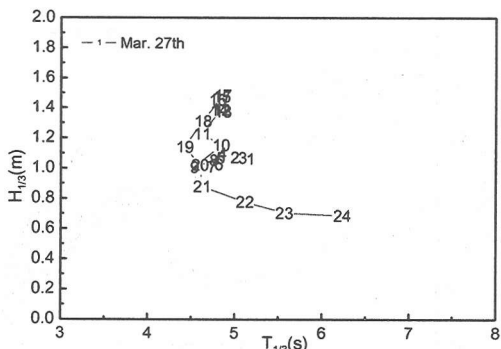


図-8 有義波周期と有義波高の関係 (2001/3/27)

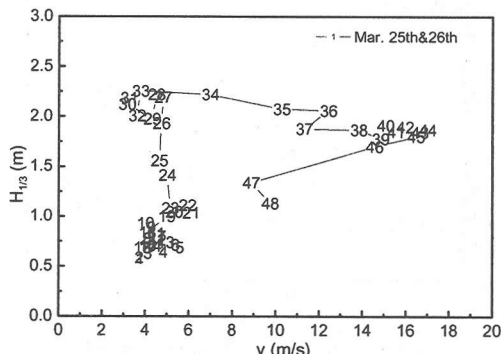


図-10 風速と有義波高の関係 (2001/3/25-26)

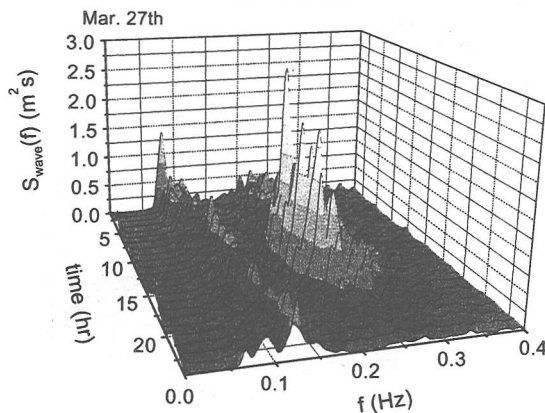


図-9 波のパワースペクトルの径時変化 (2001/3/27)

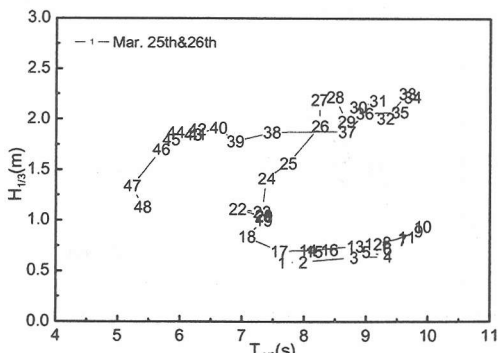


図-11 有義波周期と有義波高の関係 (2001/3/25-26)

達し、それが到達したことによるものと考えられる。15時以降、風速が増加していないにも関わらず、0.2Hz付近からパワースペクトルが発達している。これは、観測地点では風速は増加していなかったが、観測地点近くの太平洋沖では低気圧が接近してきた影響により、減衰距離が小さくなり、うねり成分が増加したと考えられる。一般に低気圧の速さは概略30km/h~40km/hであるのに対し、深海におけるうねりの伝播速度は周期10sの場合、約56km/hとなる。したがって、うねりが風域よりも先に対象海域に到達したと考えられ、このような観測結果となったものと考えられる。また、図-10に示した風速と有義波高の散布図がΓ字形になっているのもそのためであると考えられる。なお、この場合でも図-11に示したように、波の発達過程において有義波周期と有義波高の関係はブーメラン型の分布形状となる。

5. 経験式との比較

風波の統計理論によると、風波のスペクトルと有義波高は、スペクトルの0次モーメント m_0 と式(1)の関係で近似される⁵⁾。

$$H_{1/3} \cong 4.0\sqrt{m_0} \quad (1)$$

一方、ゼロアップクロス法で定義した波の平均周

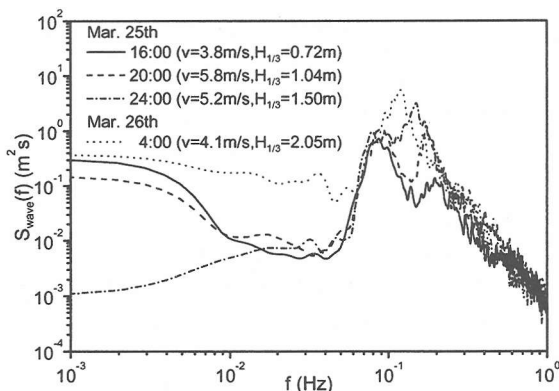


図-12 波のパワースペクトルの変化
(2001/3/25-26)

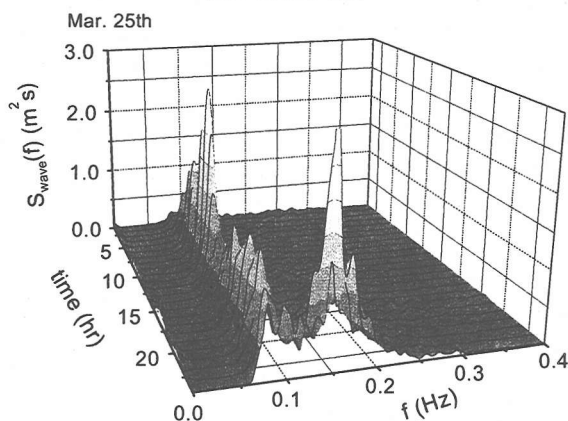


図-13 波のパワースペクトルの径時変化
(2001/3/25)

期 \bar{T} は、式(3)で計算される。

$$\bar{T} = \sqrt{m_0 / m_2} \quad (3)$$

ここに、 m_2 は2次モーメントである。さらに、平均周期と有義波周期の関係はおよそ式(5)のようになる。

$$T_{1/3} \cong 1.2\bar{T} \quad (5)$$

また、風波の発生域における波高と周期の関係として $H \sim T^{3/2}$ の形をしているTobaの3/2乗則がある⁵⁾。

図-14と図-15にこれらの経験式や理論式による値と実際の観測値からゼロアップクロス法により求めた有義波周期と有義波高の関係を示す。図-14によると、風波の発達域では実際の値と経験式による値は近いが、うねりの成分が支配的な領域では風波を対象とした経験式による値は有義波周期を小さく見積もる傾向があることが確認できる。また、図-15より風波の発達域において、Tobaの3/2乗則が成り立つことが確認できる。また、図-14と図-15では $T_{1/3}$ の切片の値が違うことが確認できる。11月30日は11月25日より現場海域の風域が大きい状態であり、このことから、現場海域の風域が大きいと $T_{1/3}$ の切片が大きくなり、風波の発達曲線が右にシフトすると思われる。

6. 風速と有義波高と有義波周期の関係

(1) 有義波高と有義波周期の関係

図-16に2001年11月の1ヶ月間全体における有義波

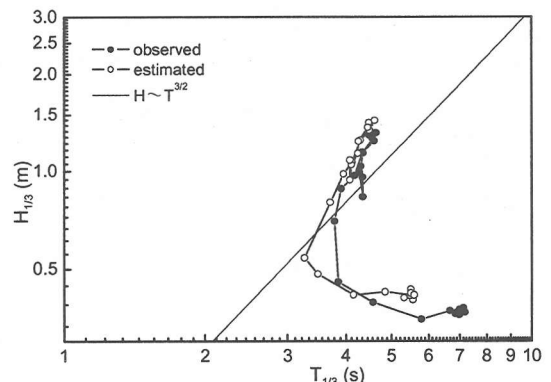


図-14 有義波周期と有義波高の関係
(2001/11/25)

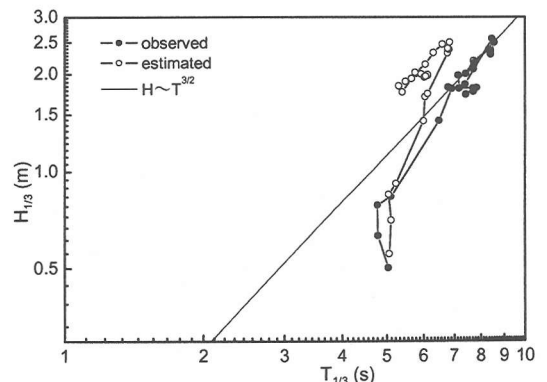


図-15 有義波周期と有義波高の関係
(2001/11/30)

高と有義波周期の関係を示す。全体的にブーメラン型の分布形状となっている。ここで、これらの値を詳細に検討した結果、①～④にグルーピングできることが明かとなった。すなわち、①は太平洋沖や日本近域に低気圧が存在せず、高気圧に覆われた状態（図中▲）である。すなわち日本近域に風域が存在しない状態である。この場合、現場付近の風速が小さく、スペクトルのピークは0.1Hz付近にあるがピーク値は小さい状態である。②は太平洋沖遠方に低気圧が存在する場合である（図中△）。このとき、太平洋沖遠方に風域が存在し、外洋からのうねりが大きくなる場合であると考えられる。このような場合、スペクトルのピークは0.1Hz付近かそれ以上であり、有義波の成分はほとんどがうねりとなる。そのため、有義波周期が大きく、有義波高と有義波周期は線形的に増加する。③は日本近域の北方に風域が存在する状態であり、ブーメラン型の分布形が見られる（図中○）。つまり、現場海域の風速が増大することにより、スペクトルは0.3Hz付近の成分波の発達のために双峯型になり、風波のピークは増大しながら低周波側へ移動している状態である。④は、日本上空か日本近域の南方を風域が東進する状態であり（図中●）、波浪が定常状態近くまで発達することが多い。現場海域の風域が③の状態より大きい場合、散布図に右にシフトしている。

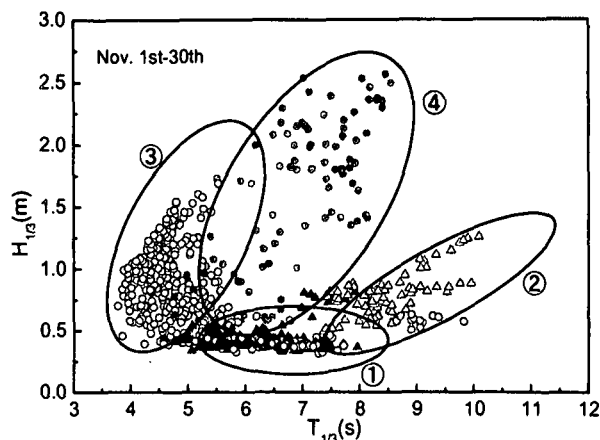


図-16 2001年11月の有義波周期と有義波高の関係

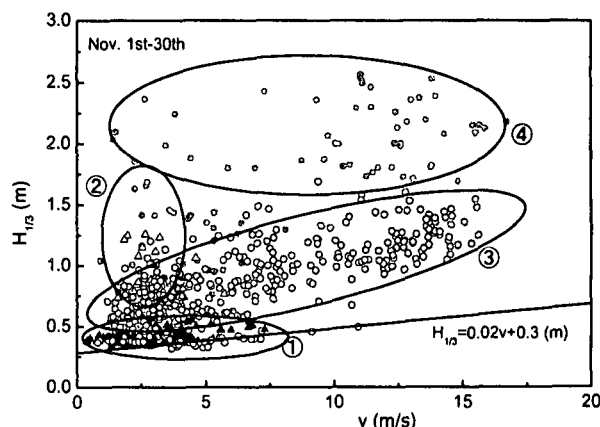


図-17 2001年11月の風速と有義波高の関係

(2) 風速と有義波高の関係

図-17に、11月全体の風速と有義波高の関係を示す。図中の①～④は図-16の①～④と対応している。太平洋沖に低気圧が存在せず、日本近域が高気圧に覆われた状態つまり、①の場合は、白浜の観測結果で認められた³⁾ように、風速と有義波高の間に傾きが0.02の線形関係が成り立っていることが確認できる。すなわち、傾き0.02の関係は外洋に面した遠州灘海岸でも共通の結果であることが指摘できる。④は、観測点近くの南方に低気圧が存在する状態であり、この場合は、低気圧の進路を考慮すれば、さらに細かくパターン化することができる。③は観測点の北方に低気圧が存在し、現場海域の風速が大きい状態であり、この場合は、有義波において風波が支配的となり、図-17から明らかなように、両者の間に正の線形関係があるとみなせる。

7. 結論

本研究で得られた主な所見を以下に示す。

- 1) 風の発達期では、まず低周波数成分の風が発達し、その後、高周波数帯の成分が発達する。
- 2) 波のパワースペクトルには、双峯型スペクトルが頻繁に出現する。それぞれのピークは遠洋からのうねりと対象海域の風場による風波に対応する。
- 3) 日本近域や太平洋沖に大きな風域が存在せず、風波の影響の小さい場合、風速と有義波高の間に傾

きが0.02の線形関係が成立する。

- 4) 風波の発達時の特性により、有義波高と有義波周期はブーメラン状の曲線上で変化する。

謝辞：本研究を行うにあたり貴重な資料の提供をいただいた関係各位に感謝の意を表す。また、本研究は科学研究費（基盤研究(C)(2)：代表 水谷法美）の補助を得て行われたことを付記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) Mitsuyasu, H. : Recent studies on ocean wave spectra, in *Theoretical and Applied Mechanics* (eds. F. I. Niordson and N. Olhoff), North-Holland, pp.249-261, 1985.
- 2) 高山知司, 高橋英紀, 永井紀彦: 御前崎における多峯型方向スペクトル波の出現特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.76-80, 2000.
- 3) 水谷法美, 吉田達也, 番場豊和: GPV を利用した海上風の数値計算と観測資料に基づく風と波の相関に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.206-210, 2001.
- 4) 吉田達也: 海上風と波浪の周波数特性と海上風の時空間変化の推算に関する研究, 名古屋大学修士論文, 23p, 2001.
- 5) 光易 恒: 海洋波の物理, 岩波書店, 210p, 1995.