

浅海域における不規則波のエネルギーの伝播特性

木 村 晃*・上 総 周 平**

1. はじめに

十分に発達した不規則な海の波は無数に多くの成分波の重なり合ったものとして取り扱われることが多い。例えば uni-directional な不規則波の場合、

$$\eta(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(k_n x - \omega_n t - \varepsilon_n) \dots\dots\dots (1)$$

のように表わされる。

不規則波に対する線型重ね合わせモデルの妥当性について最近いくつかの研究が行われたが^{1),2),3),4)}、共通した結論としてスペクトルのピーク周波数 f_p 付近の周波数帯の成分波は線型の分散関係をほぼ満足しながら伝播するが、それより高周波側の成分波は必ずしもこの関係を満足せず、見かけ上 dominant な成分波の波速で伝播していることが報告されている。その他、伝播距離の増加とともに、2点間におけるコヒーレンスが低下することなども指摘されている。郭ら⁵⁾は narrow band の風波を対象として検討をおこない、方向分散と非線型性を考慮することによりこれらの点がある程度説明できることを示している。しかし同時にそこで、 f_p 付近の主要成分波については従来通り線型の分散関係を満たしつつ伝播すると考えてよいと結論している。この間、著者ら⁶⁾は上に示した各研究者が対象とした区間（主要成分波の波長程度）より長い区間（10波長程度）での不規則波の伝播について検討を行ない、空間的に成分波の概念が成立すると見なし得るのは高々その成分波の2波長程度であることを指摘した。

この研究はやはり浅海域の不規則波に対する成分波の重ね合わせモデルを検討するとともに、不規則波のエネルギーの伝播特性について検討したものである。

2. 不規則波の伝播に関する実験結果

(1) 実験装置

実験は京都大学工学部土木工学科に設置された長さ 27m、幅 50cm、深さ 75cm の両面ガラス張り水槽を用いて行った。実験に用いた不規則波は Pierson-Moskowitz

型あるいはそれより幾分 narrow band なスペクトルをシミュレートしたもので⁷⁾、ピーク周波数を変化させて、水平床、1/10 および 1/20 のスロープを用いて各々 10 ケースづつ計 30 ケースの実験を行った。波高計は W-1 から W-12 まで、12 本等間隔（間隔は主要成分波の波長に応じて 50cm から 1m まで変化させた）に設置して測定した。

(2) コヒーレンス

図-1 はピーク周波数 $f_p=0.5$ Hz（水平床、水深 $h=50$ cm）の不規則波における W-1 と W-3, W-5, ..., W-11 の各波高計（2m 間隔）相互のコヒーレンス COH

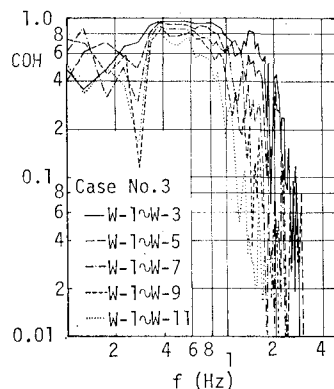


図-1 伝播にともなう COH の変化

を示したものである。実線で示した W-1 と W-3 の結果について見ると、 f_p 付近では 1.0 に非常に近い値を示しているが、その周波数帯を外れると急激に値が落ち込んでいることがわかる。郭ら⁵⁾ならびに加藤ら⁸⁾は不規則波の方向分散によってこの急激な低下を説明することを試みているが必ずしも十分成功しているとはいえない。特に本研究で用いた不規則波は機械的に発生させたものであり、方向分散はまったくない。郭らの示した bound wave の存在による COH の低下も方向分散のない場合にはここでは COH の低下の理由にならない。

同じ図-1 の W-1 と W-5 以下のコヒーレンスも伝播距離の増加とともにしだいに小さくなっているがやはり実線で示した W-1 と W-3 のものとはほぼ同じ周波数

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部海洋土木工学科

** 正 員 工修 三重県庁河川課

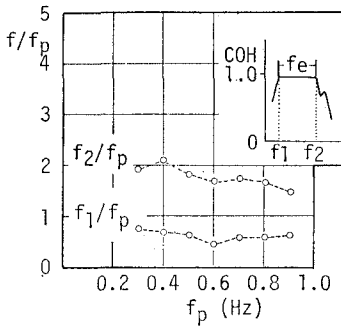
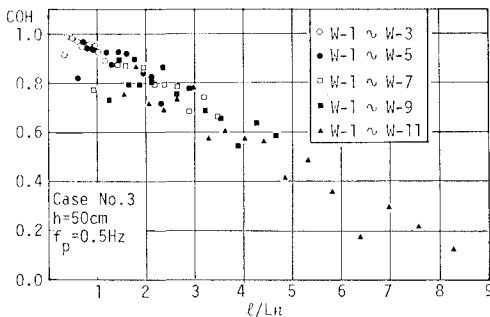


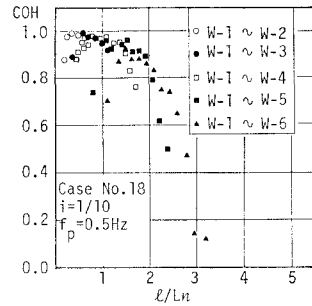
図-2 有効周波数帯

付近で急激な落ち込みを示している。いま 図-2 の右上に示すように、COH の値が急な低下を始める低周波側の限界を f_1 、高周波側を f_2 とし、それらを f_p で割って示したものが 図-2 である。(水平床, $h=50$ cm) f_p の増加とともに有効周波数帯の幅 $f_e (=f_2-f_1)$ はわずかに狭くなる傾向はあるものの、 $0.75 \leq f/f_p \leq 1.5$ の範囲は COH の値のばらつきも少なく、その変化は比較的有意であると考えられる。この周波数帯に含まれる成分波について、その波長 L_n を微小振幅波理論による波長に等しいと仮定し、図-1 と同じ波についてそれぞれの波高計の間隔 l との比 l/L_n と COH との関係を示したものが 図-3 である。図から、 l/L_n の増加にともない

図-3 COH と l/L_n の関係 (水平床 $h=50$ cm)

COH の値がほぼ直線的に減少していることがわかる。水平床で行ったすべての実験結果は f_p 、水深にかかわらず、図-3 とほぼ同じ結果が得られ、2 波長程度離れると COH の値は 0.8、7~8 波長離れると 0.1 以下に下り、ほとんど相関のなくなることがわかった⁶⁾。

図-4 は 1/10 のスロープに 図-3 と同じ不規則波を作用させた場合の COH の変化を、図-3 と同様にして示したものである。有効周波数帯は 図-3 と同じ範囲を用い、成分波の波長としては 2 つの波高計の中央の水深における値を採用した。各波高計の水深は W-2 ($h=50$ cm) から 10 cm きざみで浅くなる。砕波帯は水深 15 cm 以浅であり、その影響を含むのは▲印のデータであるが、他のデータと比して平均的な傾向に大きな変化は

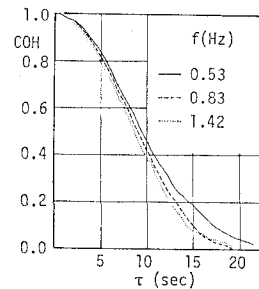
図-4 COH と l/L_n の関係

ない。斜面上の不規則波の場合 shoaling にともないスペクトル形状が変化したが、成分波に関して単なる振幅の変化であればコヒーレンスの計算には振幅の正規化の手順が含まれているため、重ね合わせモデルが成立する限り、COH=1.0 となるはずである。図からわかるように、 $l/L_n > 2$ の領域では COH の減少は水平床の結果に比して急であり、 $l/L_n = 3$ で 0.1 程度にまで低下する。この傾向は他のケースにおいても見られ、勾配が急であるほどまた f_p が小さいほど顕著であった⁶⁾。

3. 成分波の重ね合わせモデルに関する考察

ここで対象とした uni-directional な不規則波の場合、成分波の重ね合わせモデルが成立すれば、すべての周波数帯でコヒーレンスは 1 となるはずである。コヒーレンスの計算には波高計相互の距離は必要でないため、成分波に対して線型の分散関係式が成立するか否かは COH = 1.0 となるための必要条件ではない。したがって、uni-directional な不規則波の場合、bound wave も周期的な波である限りコヒーレンス低下の理由にならない。

この点について検討するため次のような解析を行った。すなわち、図-5 は $f_p = 0.7$ Hz の不規則波の W-1 の記録を $\eta(t)$ と $\eta(t+\tau)$ とだけずらせたものをあたかも独立した 2 つのデータのように解析し、COH と τ の関係を示したものである。図からわかるように、周波数に関係なく τ の増加とともに COH の値は急激に低下し、 $\tau = 15$ sec で 0.2 以下にまで低下する。この計算に用いたデータの長さは 819.2 sec 分であり、互に 15 sec の時間差をつけてもなお 96.2% のデータを共有しているにもかかわらず COH の値は急激に低下している。この解析では各成分波が free wave か、bound wave かあるいは両者の重なり合ったものであるかということにはまったく無関係であり、ただ成分波の位相が時間的に連続しているかどうかだけが問題となる。したがってこのような COH の低下の理由は周波数分析結果の果得られる成分波の振幅、初期位相角が連続していな

図-5 τ による COH の低下

い、つまり成分波の定常性の仮定（成分波の重ね合わせモデル）に問題があると考えられる。

つぎに現地波浪を用いて検討を行う。解析に用いたデータは、琵琶湖波浪観測グループ⁸⁾が彦根愛西地区で観測したデータであり、一様な風域場でほぼ定常に達した風波 ($H_{1/3}=0.72\text{ m}$, $T_{1/3}=2.8\text{ sec}$) である。平均的な波の進行方向 (NNW) に沿って一番沖側の波高計からほぼ直線上に 4.9 m, 6.4 m および 8.8 m 離れた 4 本の波高計 (水深はいずれも 4 m) の記録を用いて検討を行った。このデータにおいても有効周波数帯はほぼ $0.75 < f/f_p < 1.5$ であった。図

一6 はこの周波数帯に含まれる成分波について図一3と同様に解析し、COH と l/L_n の関係を示したものである。波高計による差はほとんど見られないが、やはり l/L_n の増加にともない COH の値が急激に低下している。風波の場合、方向分散により見かけ上コヒーレンスが低下する。例えば方向スペクトルを

$$E(f, \theta) = S(f) \cdot G(\theta) \dots\dots\dots (2)$$

のように仮定し、方向分布関数 $G(\theta)$ として $\cos^s \theta$ のタイプのものを考えると、 s によりコヒーレンスは見かけ上図中の実線のように変化する。土屋ら⁹⁾によれば、当日のピーク周波数付近での s の値は 26 程度であり、有効周波数帯の上限で 4 程度まで低下している*。図からわかるように、実測値は s の値を 4 としたものよりさらに小さく、 l/L_n にともなう COH の低下は波の方向分散を考慮してもなお十分説明し得ないことがわかる。

4. 非定常スペクトル

3. までの検討で示したように、不規則波の成分波の定常性に問題のあることがわかった。そこでここでは非定常スペクトルの手法を用いてこの点を更に検討する。最近いくつか提案されている非定常スペクトル理論のうち、ここでは不規則波浪の比較的短い時間の伝播特性の検討に適している Mark¹⁰⁾ の physical spectrum を用いて解析を行った。physical spectrum は

$$S(f, t) = \left\langle \left| \int_{-\infty}^{\infty} w(t-u)x(u) \times \exp(-i2\pi fu) du \right|^2 \right\rangle$$

* 土屋らは方向分布関数を周波数の関数として取り扱っている。

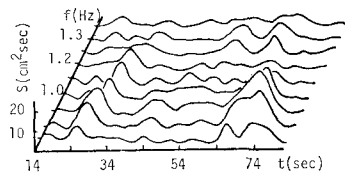
$$\int_{-\infty}^{\infty} [w(u)]^2 du \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。 $w(u)$ はデータウィンドウであり、本研究では

$$w(u) = \beta \frac{\sin \pi \beta u}{\pi \beta u} \dots\dots\dots (4)$$

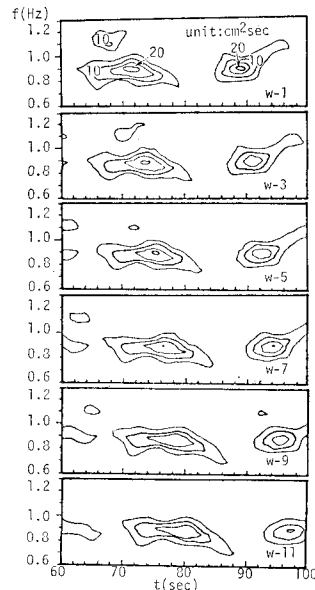
を用いた。 β の値に任意性があるが、ここでは次のように考えた。すなわち、図一5に示したように $\tau=10\text{ sec}$ で COH は 0.5 程度まで下る。したがってデータウィンドウもこの程度の時間における不規則波の挙動を促えるものでなければならない。図一5の解析に用いたデータは $f_p=0.7\text{ Hz}$ であり、上の 10 sec の間には主成分波が約 7 周期程度含まれる。そこで、ここでは $\beta=2/7T$ (T は主成分波の周期、ここでは平均周期を用いた) を用いることにした。ピンクノイズを用いた検定を行ない、このデータウィンドウが良好な結果を与えることを確認した。ただ、式 (3) にはアンサンブル平均の操作が含まれているが、uni-directional ということでここでは生の推定値のままで検討を行った。

図一7 は $f_p=1.0\text{ Hz}$ の不規則波の physical spectrum



図一7 Physical spectrum

$S(f, t)$ を示したもので、W-1 のデータを解析した結果である。図中には式 (4) のデータウィンドウの周波数窓

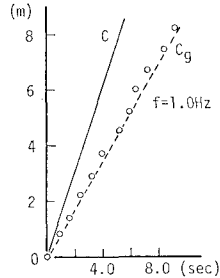


図一8 エネルギーの伝播 ($f_p=1.0\text{ Hz}$)

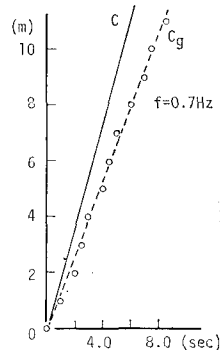
間における分解能を考慮して 0.1 Hz 間隔の physical spectrum を示した。図からわかるように、ピーク周波数付近の成分波においてかなり顕著なエネルギーの凹凸がみられる。ピンクノイズを用いた解析結果では成分波の振幅はほぼ一定の値が得られているので、この凹凸は成分波の振幅がかなり大きく変化していることを意味する。

図一8 は図一7に示した非定常スペク

トルの周波数—時間平面において $S(f, \theta)$ の等しくなる点を結んだいわゆる等エネルギー線であり、上から順に W-1, W-3, ..., W-11 と 1.5m 間隔の波高計の記録を解析したものである。各波高計で測定した水位変動は W-1 と W-11 では相互に見分けがつかないほど変化しているにもかかわらず、非定常スペクトル解析の結果は図のように非常によく似たエネルギー分布形を保ちながら伝播していることを示している。図—8 で顕著なエネルギーのピークに注目すると、下手側の波高計ほどその出現時間が遅れていることがわかる。図—9 は 1 例として $f=1.0\text{Hz}$ のエネルギーピークの伝播特性を検討したもので縦軸には W-1 を起点とした伝播距離、横軸には W-1 におけるピークの出現時間を 0 sec とした各波高計でのピークの出現時間を取ってデータをプロットした。図中の実線はエネルギーピークの周波数に対応する波速(微小振幅波理論による)を示したもので、破線は群速度である。両図ともデータは破線とほぼ一致しており、エネルギーはほぼ群速度で伝播していることが良くわかる。図—10 は他のケースの不規則波において、エネルギーピークの周波数が 0.7 Hz の場合のものを示したものであるが、破線で示した群速度との対応は良好であり、他のケースについてもすべて同様な結果が得られた。

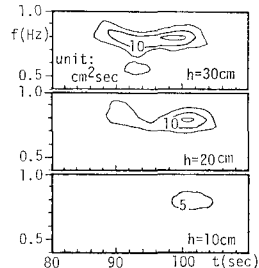


図—9 エネルギーの伝播特性 ($f=1.0\text{Hz}$)



図—10 エネルギーの伝播特性 ($f=0.7\text{Hz}$)

次にスロープ上を伝播する波に対して同様の解析を行った結果を示したものが図—11 である。これは $f_p=0.7\text{Hz}$ の波の 1/10 のスロープにおける水深 30cm から 10cm 付近のエネルギーの伝播特性を示したものである。砕波水深は 15 cm 以浅であり、図からもこの付近でエネルギーが急激に消滅してゆくのがわかる。斜面上におけるエネルギーも群速度で伝播していることが確認できた。



図—11 斜面上のエネルギーの伝播 ($f_p=0.7\text{Hz}$)

5. おわりに

十分に発達した風波に対して、式 (1) の関係が成立するならば、波は波速で伝播しているように見えるはずのものである。ところが実験値はむしろ群速度で伝播している。このことから、不規則波に対してはむしろ次のようなモデルの方が妥当と考えられる。すなわち、不規則な波は前後に 2~数波の比較的波高・周期の似かよった波が連なっており、これが 1 つの群をなし、その周期に対応した群速度で伝播してゆくというものである。したがって、図—3, 4 などに示した COH と l/L_n の関係は l の長さが平均的な波群の長さ以内であれば COH は 1.0 に近い値を取り、 l が大きくなって波群の長さを越えると、相互の波群に含まれる波相互の周波数、位相の連続性がないため、COH の値が徐々に低下して行く。一方図—5 については、同一波高計の記録であっても相互のずらし時間 τ が、上述した波群がその波高計を通過するのに要する時間内であれば COH は 1.0 に近い値を示すが、 τ が大きくなるとやはり前後の波群に位相の連続性がないためやはり COH ははだいに小さくなってゆく。

謝辞: この研究は昭和 53 年度に著者らが京都大学で行った研究である。御指導を賜った岩垣雄一教授、解析に協力していただいた兵庫県庁田中剛氏(当時学生)に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 光易 恒・郭 一羽: 減衰領域における風波の研究——成分波の波速について——, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 323~328, 1976.
- 2) 石田 昭・金 泰順: 風波の波数周波数スペクトルに関する実験的研究, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 317~322, 1976.
- 3) 加藤 始・鶴谷広一: 風波の成分波の波速について, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 255~259, 1974.
- 4) Lake, B. M. and H. C. Yuen: A new model for non-linear wind waves, Part 1, Physical model and experimental evidence, J. Fluid Mech., Vol. 88, Part 1, pp. 33~62, 1978.
- 5) 郭 一羽・光易 恒・増田 章: 風波の成分波の波速に関する研究, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 88~92, 1977.
- 6) 岩垣雄一・木村 晃: 浅海域における不規則波の分散特性について, 京都大学防災研究所年報, 第 20 号, B-2, pp. 493~512, 1977.
- 7) 岩垣雄一・木村 晃: 不規則波発生機による現地波浪のシミュレーションシステム, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 231~236, 1974.
- 8) 岩垣雄一・他: 琵琶湖における波浪観測について, 京都大学防災研究所年報, 第 19 号 B, pp. 361~379, 1976.
- 9) 土屋義人・山口正隆・小矢田宏: 一様風域場における波浪の方向スペクトル特性について, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 261~265, 1977.
- 10) Mark, W. D.: Spectral analysis of the convolution and filtering of non-stationary stochastic process, J. Sound Vib., Vol. 11, No. 1, pp. 19~63, 1970.