

砕波帯における不規則波のパワー・スペクトルの形状について
—特に高周波数域のスペクトル勾配について—

大阪大学工学部 正員 岩田 好一郎

1. 緒言 : 近年, 捨石堤の安定, 海洋構造物の動的応答, 漂砂, 沿岸砂洲の形成, 等に風波の水位変動のパワー・スペクトル形状が重要な影響を与える事が指摘されている。海岸・港湾構造物の大半が砕波帯に浅に構築されているので, 浅海砕波帯における不規則波のパワー・スペクトル形状の特性を把握しておく事は工学的に有意義である。浅海砕波帯ではパワー・スペクトル(周波数スペクトル)の高周波数域では, 深海においてPhillips (1969)が示した“ -5 乗則”に対応するような平衡スペクトルが存在するものと考えられる。井島(1970)は長波域(長波に対応する周波数域)で“ f^{-1} ”(fは周波数), 深海波域で“ f^{-5} ”に比例する平衡スペクトルを提案した。Kitaigorskii (1975)は, 長波域で“ f^{-3} ”, 深海波域で“ f^{-5} ”に比例する平衡スペクトルを提案し, Thornton (1977)は浅海で, スペクトルの高周波数域が“ f^{-3} ”に比例する事を指摘した。しかし, Lee (1978)は“ f^{-2} ”に比例するスペクトルを計測している。このように, 浅海砕波帯で不規則波はいかなるスペクトル形状を示すのか, あるいは, いかなる物理量がスペクトル形状を支配するのか不明な点が多い。ここでは, まず次元解析により砕波帯内のパワー・スペクトル形状を提案する。ついで, 水理実験を行ない砕波帯内でのスペクトル形状の特性と次元解析の妥当性について検討する。

2. 次元解析 : 不規則波は多くの周波数(狭帯域であるが)から構成されているので, 浅海においては, 深海波の条件($\sqrt{g/4\pi h} < f < \frac{1}{2\pi} \sqrt{\rho g^3/\sigma}$)を満している周波数, また, 長波の条件($f < \sqrt{g/625h}$)を満す周波数, それとその中間の波の条件($\sqrt{g/625h} < f < \sqrt{g/4\pi h}$)を満す周波数が存在すると考えられる。なお, g, h, ρ , σ はおのおの重力加速度, 静水深, 流体密度と表面張力である。重力波のパワー・スペクトル $S(f)$ を支配する物理量は式(1)で与えられるので, 上述の三つの周波数域に対応して卓越する物理量を選

$$S(f) = F(g, h, f, \rho, \mu) \quad (1)$$

定し, $S(f)$ の次元〔(長さ)²×(時間)〕に一致するように組合せを決定すると次式をうる。

$$S(f) = K_1(S, \rho, \mu) \cdot g^2 \cdot f^{-5}; \quad f_2 \leq f < f_3 \quad (2)$$

$$= K_2(S, \rho, \mu) \cdot ghf^{-3}; \quad f_1 < f < f_2 \quad (3)$$

$$= K_3(S, \rho, \mu) \cdot h^2 f^{-1}; \quad f \leq f_1 \quad (4)$$

ここで, K_1, K_2 , と K_3 は無次元係数, $f_1 = \sqrt{g/4\pi h}$, $f_2 = \sqrt{g/625h}$ と $f_3 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\rho g^3/\sigma}$, Sと μ は水底勾配と水の分子粘性である。同式によると, “ -3 乗則”はKitaigorskiiと異なり

中間周波数域 ($f_1 < f < f_2$) に存在する。式(2)～式(4)より、浅海砕波帯では図-1に示すような平衡スペクトル形状が提案されよう。

3. 水理実験 : 実験はオレゴン州立大学の不規則波造波水槽 ($104^m \times 4.6^m \times 3.7^m$) で行われた。一端にはフラップ型造波機, 他端には $1/12$ のコンクリート製の斜面が設置されている。不規則波は Bretschneider 型スペクトルを期待スペクトルとして生起せしめた。図-2 は実験値と期待値との比較を示した一例であるが, 両者の一致度は極めて良いとはいえない。水位計測は 3 台の音響型水位計を用いて, 水深 350 cm, 250 cm, 200 cm, 150 cm, 90 cm, 60 cm, 40 cm, 20 cm の 8 地点で行った。図-3 は音響型水位計と容量式水位計で計測されたパワー・スペクトルの差異を示したものである。ピーク周波数の高周波域では両者の差異はほとんどなく, 高周波数域のパワー・スペクトル形状の論議は音響型水位計の記録を用いて精度高く行える。実験波は 5 種類であり, 表-1 に統計量とスペクトル量が示されている。なお, H_{max} と T_{max} は最大波の波高と周期, $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ は有義波の波高と周期, $\bar{T}$ と $\bar{H}$ は平均波の波高と周期, H_{rms} は rms 波高, $T_z = \sqrt{m_0/m_2}$, m_0 と m_2 はゼロ次と 2 次モーメント, Q_p はスペクトル尖鋭度, k は波の尖鋭度パラメーター (Nath (1976)), H'_0 と L'_0 は相当沖波波高と波長である。なお, 統計量はゼロアップクロス法, パワー・スペクトルは FFT 法 (サンプリング間隔 16.67 Hz, データー数 2048) で計算している。

4. 実験結果とその考察 : 図-4 は浅海砕波帯内の水深変化に伴うパワー・スペクトルの形状変化を示した一例である。なお, $L^* = h/L'_0$, $U^* = H'_0 L'^2_0/h^3$ である。同図によると, 水深が浅くなるにつれてスペクトルの形が全体的に平坦になっていく。水深が, 90 cm, 60 cm, 40 cm, の地点では, ほぼ f_2 を境にしてスペクトルの勾配が急変し, $f_1 < f < f_2$ の周波数域では, スペクトル勾配がほぼ f^{-3} に比例しており, 次元解析から求まる “-3 乗則” が存在している事が認められる。しかし水深が 20 cm の地点では f^{-3} より緩やかな $f^{-2.1}$ 程度の勾配になっている。この事は “-3 乗則” は汀線近傍まで含む浅海砕波帯全域で成立しない事を示しており, “-3 乗則” はある限

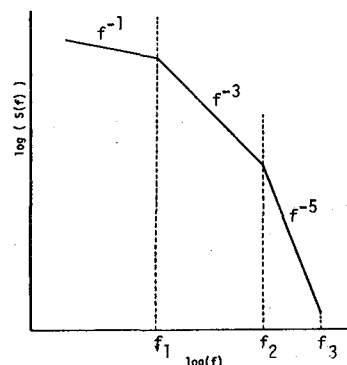


図-1 平衡スペクトル

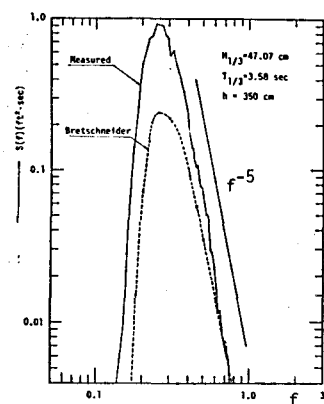


図-2 発生波のスペクトル

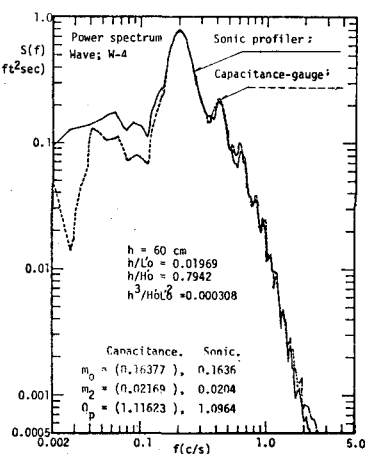


図-3 スペクトルの比較

られた領域にのみ成立するものと考えられる。一方、 $f_2 < f < f_3 (=13.2 \text{ Hz})$ の領域のスペクトル勾配は、水深 90 cm, 60 cm, の地点で f^{-5} に比例しており、海深で認められる “ - 5 乗則 ” はそのま

ま認められ、次元解析の結果と一致している。なお、40 cm 以浅ではパワー・レベルが低いので、この領域での勾配の論議は出来ない。また、本実験の範囲内ではピーク周波数が $f < f_1$ の領域にないため、 “ - 1 乗則 ” の検討はできない。つぎに、さらに f_1

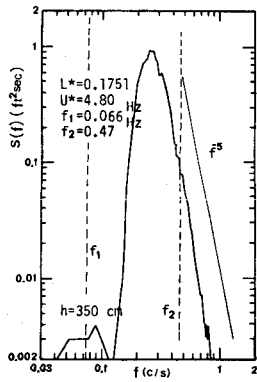
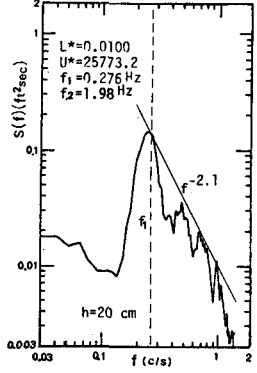
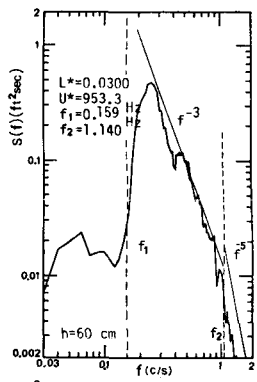
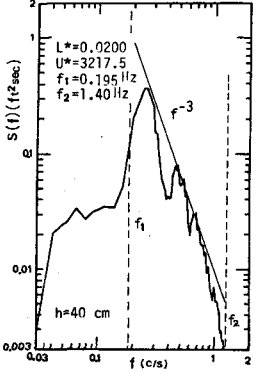
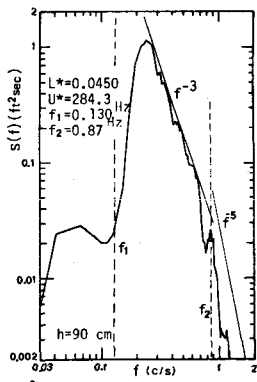


図 - 4 水深変化に伴うパワー・スペクトルの変形



$< f < f_2$ の周波数域のスペクトル勾配

(m) と $f_2 \leq f < f_3$ の周波数域のスペクトル勾配 (n) の水深変化に伴う変化の特性について検討を加える。

wave	H_{max}	$H_{1/3}$	$\bar{H}$	H_{rms}	T_{max}	$T_{1/3}$	$\bar{T}$	T_z	m_0	m_2	Q_p	κ	H'_0	H'_0/L'_0
W - 1	124.88	63.10	40.92	19.57	2.44	2.67	2.53	2.55	0.1503	0.0146	2.298	0.100	66.17	0.0595
W - 2	75.52	47.07	34.47	12.10	2.91	3.58	3.21	3.22	0.2681	0.0415	2.169	0.212	51.51	0.0258
W - 3	112.00	73.78	49.57	18.68	3.23	4.18	3.74	3.49	0.3744	0.0309	2.182	0.134	80.48	0.0295
W - 4	109.44	69.73	54.61	18.32	4.36	4.42	3.88	3.77	0.3642	0.0256	1.883	0.112	75.55	0.0248
W - 5	71.36	44.61	28.65	11.30	5.17	5.02	4.48	4.47	0.1346	0.0067	2.1639	0.049	47.31	0.0120

表 - 1 発生波の特性

なお、スペクトル勾配 m, n はパワー・スペクトルのピーク値の接線の勾配として求めたが、この接線が一本の直線とはならず折線となり二つの勾配が生じる場合 (ξ_1, ξ_2 とし、 $\xi_1 \geq \xi_2$ とする) があるので便宜上式 (5) と式 (6) で m と n の値を決定した。

$$\frac{\xi_1 - \xi_2}{\xi_1} < 0.05 \text{ の時 ; } n, m = \frac{1}{2} (\xi_1 + \xi_2) \text{ (5), } \frac{\xi_1 - \xi_2}{\xi_1} \geq 0.05 \text{ の時 ; } \xi_2 \leq n, m \leq \xi_1 \text{ (6)}$$

図 - 5, 図 - 6 は h/L'_0 と n, h/L'_0 と m の関係を H'_0/L'_0 をパラメーターにして示したものである。図 - 5 によれば、 h/L'_0 の変化に伴う n の変化は小さく、 “ - 5 乗則 ” は $0.02 < h/L'_0 < 0.045$ の範囲に対して認められる。一方、図 - 6 に示す m は、n の値とは異なり、 h/L'_0 の増大にともない小さくなり、 $h/L'_0 \cong 0.1$ で $m = 5$ の値が、 $h/L'_0 = 0.005$ 近傍では

$m = 2.2$ 程になる。したがって、"-3乗則"の成立している範囲は、 H_0/L_0 により若干異なるが、ほぼ $0.02 < h/L_0 < 0.04$ である。以上述べた m と n を総合すると、次元解析より提案された " f^{-3} " と " f^{-5} " で構成された平衡スペクトルは、 $0.02 < h/L_0 < 0.04$ の限定された範囲に対して存在しうるといえる。

しかし、図-5、図-6に示す合田(1975)の水底勾配 1/50 の実験値(値は著者が読みとった)は水底勾配 1/12の結果と大きく異っている。これは水底勾配の差異により碎波帯の水深が異なることに帰因すると考えられ、 h/L_0 はスペクトル勾配を論議する場合の最適な物理量でない事を示している。今後検討していかなければならない。

謝辞 : 本研究は著者が鹿島学術振興財団の援助をうけてアメリカ合衆国オレゴン州立大学に滞在している時行った研究の一部であり、有益な助言を頂いた Dr. John H. Nath に謝意を表する。また、オレゴン州立大学滞在に際して御尽力を賜った本学室田明・樺木亨両教授に深甚の謝意を表する次第である。

参考文献 : 合田(1975): 港研報告, 井島(1970): Proc. of CEC, Kitaigorodskii(1975): J. of Phys. Oceanography, Lee(1978): Summaries of CEC, Phillips(1969): The Dynamics of the Upper Ocean, Thornton(1977): J. of Phys. Oceanography, Nath(1976): J. of Phys. Oceanography.

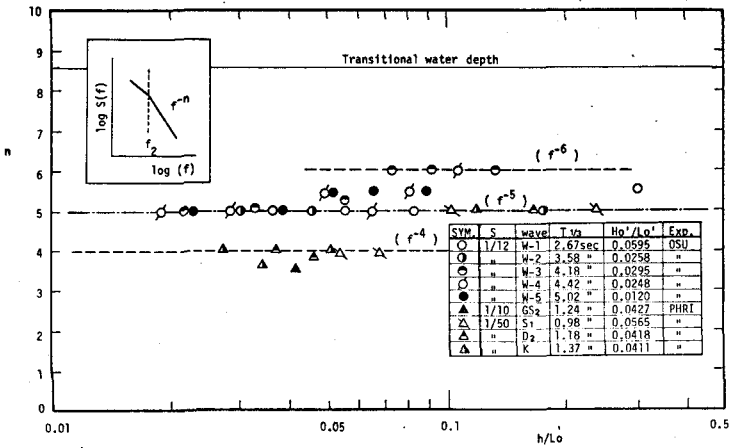


図-5 n と h/L_0 の関係

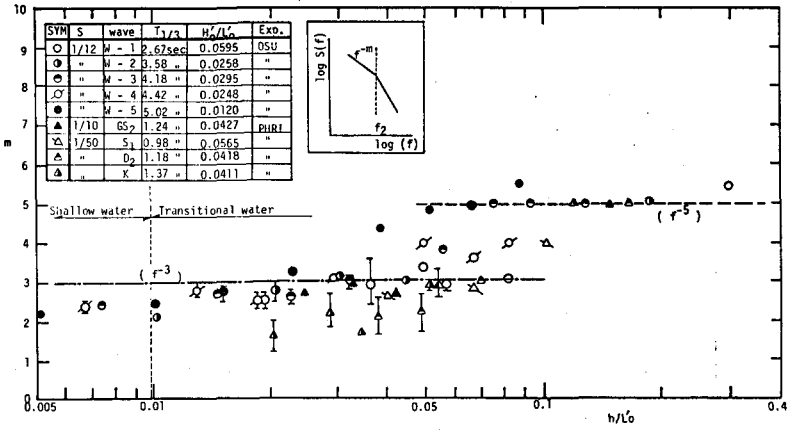


図-6 m と h/L_0 の関係