

砕波帯における波浪の伝播とソリトンモード

土屋義人*・安田孝志**・篠田成郎***・植本 実****

1. 緒 言

砕波帯における波浪の諸特性を明らかにすることは海岸工学および防災上極めて重要であるが、現地波浪のような不規則波浪の砕波に関する研究はあまりなされていない。合田¹⁾は、個々の波の砕波によりある量のエネルギーが失われ、残ったエネルギーに対応して新しい波高分布を持った波群が生ずると考えた選択的砕波のモデル化を示した。また、Thornton および Guza²⁾ は、合田の考え方に bore モデルを適用した不規則波の砕波モデルを提案している。これらの研究は、砕波による波高分布の変化そのものを説明することには優れているものの、不規則波浪の素励起に対する力学的基礎が不明瞭であり、砕波後の流速場などを検討する上で問題があると思われる。

これまでに著者らは、浅海域における波浪を特徴づけている非線形性と不規則性を同時に評価することのできる力学的表示法としてソリトンモード表示を提案し、少なくともうねり性の波浪に対する表示精度は良好であることを明らかにしてきた^{3),4)}。しかしながら、このようなソリトン表示は分散性と非線形性が平衡状態にある波動場を記述するものであり、浅海における波浪すべてに対して適用可能となるかどうかについては疑問が残されている。そこで本研究では、ソリトンモードに基づいて表示された不規則波浪を波浪ソリトン群と定義し、広範な海象条件下における現地波浪の観測記録を用いて、その伝播に伴う浅水および砕波変形などの特性を検討し、その結果より、砕波帯におけるソリトンモード表示の適用限界を明らかにする。

2. 観測記録の概要

(1) 波浪観測

本研究において解析の対象となった記録は、1983 年 11 月に京都大学防災研究所附属大渦波浪観測所におい

て実施された集中観測で得られたものの一部である。A/D 変換時のサンプリング間隔は 0.16 s であり、1 ケースにつき 4097 個のデータ (約 11 分間) を 1 つの波形記録として扱った。図-1 は、観測栈橋と解析の対象となった測点とを示す。図-2 は、解析対象となった 4 日間の有義波高および風速の時間変化を示したものである。これより、この観測期間中には 2 つの storm が出現していることがわかる。以下では、主として 2 つめの storm を中心に考察を行う。

図-3 は波のエネルギースペクトルの空間変化の一例である。(a) および (b) はそれぞれ波浪の最盛および減衰期に相当するスペクトルであり、波の非線形性に起因する倍周波成分のピークが現われている。また、汀線に

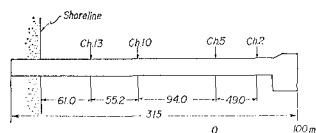


図-1 観測栈橋と波高計の配置

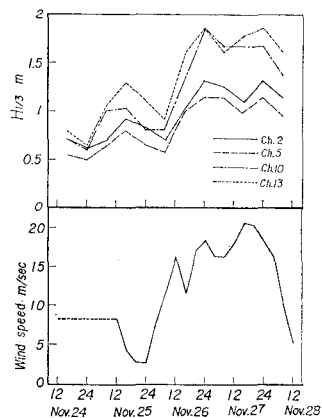
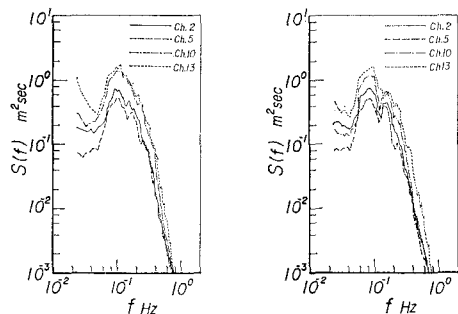


図-2 観測期間中における有義波高および風速の変化



(a) 11月27日, 16:00 (b) 11月28日, 8:00

図-3 波のエネルギースペクトルの空間変化

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部建設工学科

**** 正会員 工修 日本工営株式会社

最も近い Ch. 13 において 0.04 Hz 以下の低周波成分が増加しているが、これは反射波の影響であると思われる。

(2) 観測記録の取り扱い法

まず、図-3 からわかるように、観測記録には反射波の影響が若干存在するため、FFT による数値フィルターを用いて 0.04 Hz 以下の低周波成分を除去した。また、水位変動の定常性の検定としてノンパラメトリック手法による連検定を全ケースについて行った結果、有意水準 5% で定常性の仮説が許容されることを確認した。

3. ソリトンモードによる波形の表示

表-1 は、考察の対象となる観測波浪の特性を示したものである。図-2 より、N2608, N2624, N2716 およ

表-1 観測波浪の特性

Date & time	Nov.25, 8:00				Nov.26, 24:00				Nov.27, 19:00				Nov.28, 8:00			
Data No.	N2608				N2624				N2716				N2808			
Channel No.	Ch.2	Ch.5	Ch.10	Ch.13	Ch.2	Ch.5	Ch.10	Ch.13	Ch.2	Ch.5	Ch.10	Ch.13	Ch.2	Ch.5	Ch.10	Ch.13
Depth (m)	6.830	6.985	6.420	5.110	6.905	6.985	6.430	5.110	7.120	6.905	6.540	6.410	7.120	6.905	6.540	6.410
H_{max}	0.126	0.133	0.211	0.252	0.253	0.258	0.470	0.504	0.237	0.258	0.418	0.450	0.283	0.250	0.360	0.421
H_{rms}	0.159	0.207	0.411	0.382	0.313	0.385	0.481	0.773	0.470	0.465	0.650	0.645	0.350	0.355	0.453	0.453
Kurtosis	2.934	3.733	3.925	3.374	3.693	3.950	2.719	3.751	3.225	3.493	3.470	3.111	4.020	3.092	3.352	3.406
U_r	5.545	5.752	4.819	8.401	8.105	14.333	12.215	20.104	11.345	5.770	11.626	11.004	6.417	6.855	10.325	13.377
r_p (deg)	6.134	0.135	0.130	0.131	0.099	0.154	0.109	0.104	0.096	0.101	0.102	0.114	0.092	0.093	0.107	0.093
Number of waves	103	129	116	120	89	97	83	95	93	101	86	97	95	93	90	90
U_{rms} (m)	0.711	0.942	0.917	0.928	1.319	1.157	1.151	1.070	1.122	0.908	1.629	1.781	1.156	0.983	1.287	1.595
$U_{1/2}$ (sec)	5.459	5.539	5.777	5.350	7.515	6.407	8.143	6.959	6.458	7.842	7.012	6.012	6.923	7.246	6.037	7.458
Number of solitons	144	130	154	137	143	137	137	137	130	136	113	145	132	133	157	137
u_0 (m)	0.429	0.255	0.385	0.395	1.058	0.927	1.235	0.920	0.909	0.985	1.172	1.072	0.881	0.829	1.099	1.083
u_1	0.798	0.321	0.360	0.580	0.528	0.542	0.543	0.634	0.702	0.477	0.565	0.546	0.430	0.440	0.541	0.467
u_2 (sec)	4.107	4.944	4.251	4.740	4.723	4.334	4.351	5.925	4.901	4.668	3.654	4.467	4.593	5.377	5.028	5.977
u_3	5.030	6.160	2.162	2.863	4.182	7.003	7.401	6.070	7.765	3.615	3.600	2.743	4.793	2.978	5.240	3.075
p (A & T)	0.042	0.011	0.093	0.038	-0.032	0.041	0.038	0.112	-0.063	0.070	0.038	0.041	0.037	0.109	0.027	0.115
γ (A & K_1)	0.243	0.283	0.131	0.067	-0.020	0.239	-0.075	0.161	0.250	0.145	0.070	0.163	0.236	0.278	0.130	0.231
Mean length of run	2.593	2.554	2.152	2.213	1.850	2.407	1.801	1.610	2.198	2.242	2.128	1.643	1.653	2.050	2.259	2.225
Wave condition ¹⁾	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	P
Wind condition ²⁾	Swell & Wind wave				Wind wave				Wind wave				Swell			
Wind speed (m/sec)	11.35				16.33				20.56				10.08			
Wind direction	WSW				NW				WSW				WSW			

¹⁾ N: No breaker, P: Partially Breaking and B: Breakers (Spilling)

び N2808 はそれぞれ波浪の発生、発達、最盛および減衰期に対応すると判断される。なお以下では、表中のデータ番号を用いて議論を進めることにする。

図-4 は、観測波形とソリトン合成波形との比較を示す。細かく見ると、ソリトンの波峰間隔が狭い場合において適用性が低下する傾向がある。これは、ここでの波形の表示法が相互干渉を無視したソリトン表示であるため当然の結果とも言え、むしろ良く表示されていると思われる。また、ソリトン表示の適用性に対する碎波の影響はほとんど見られない。波峰間隔の大きなうねり性波浪を対象とした表示法を用いているにもかかわらず、碎波を含む波浪のソリトン表示の適用性がこれほどまでに良好であるのは興味深い結果と思われる。以上より、ソリトンモードに基づく波形の表示は、かなり広範囲の海象条件における波浪に対して適用可能であると判断できる。

4. 波浪ソリトン群の巨視特性

(1) 固有値分布

これまでに著者らは、一様水深場においてエネルギー逸散および相互干渉が無視できる場合には、個々のソリトンの固有値は時空間的に不変であり、その分布は波浪の伝播に伴い保存されることを理論的に示した⁴⁾。ところが、傾斜海岸上に波浪ソリトン群が伝播する場合や波浪

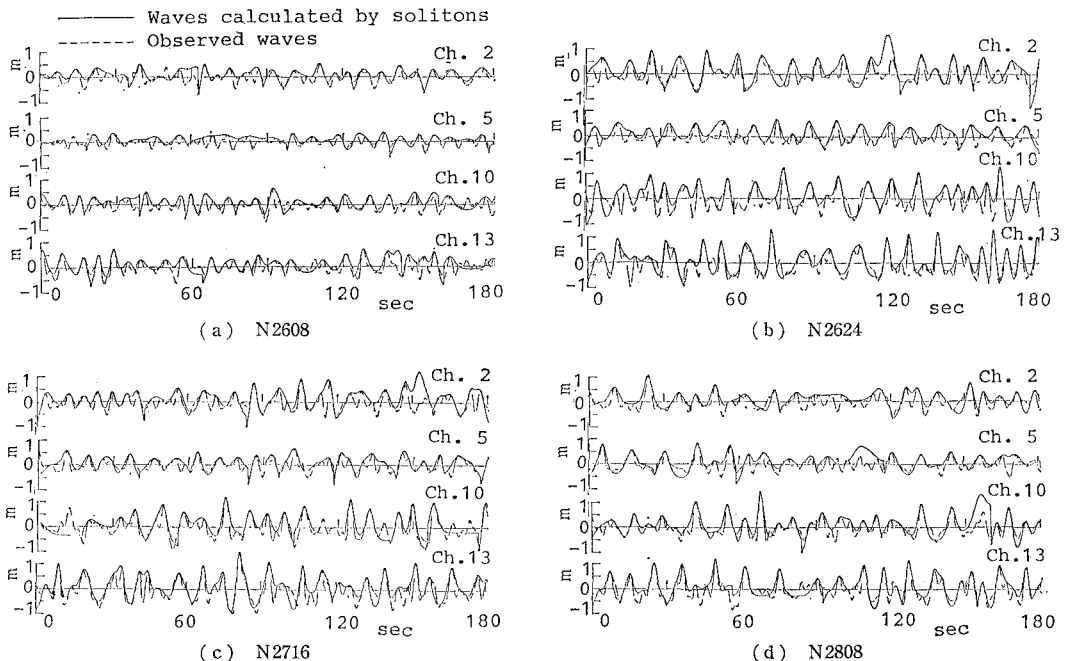


図-4 観測波形とソリトン合成波形との比較

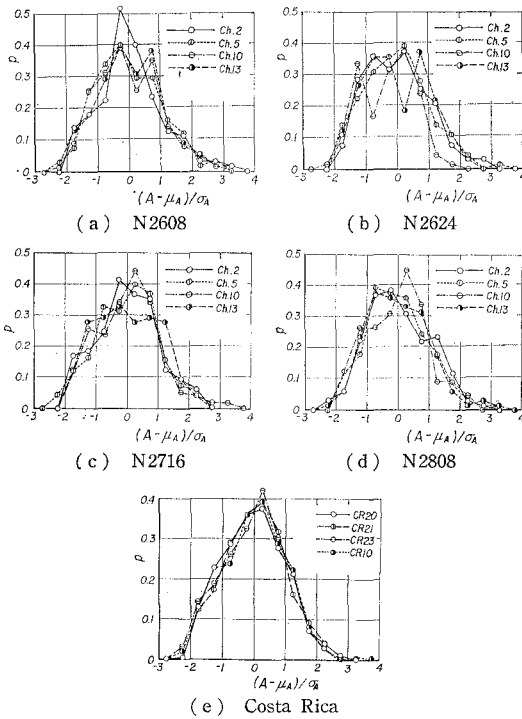


図-5 ソリトンの固有値分布の空間変化

の発達および最盛期のような強風時における固有値分布の変化については明らかにされていない。

図-5 は、規準化された固有値の標本分布の空間変化を示す。ただし、 μ_A および σ_A はそれぞれ固有値の平均値および標準偏差である。標本の大きさが 100~150 程度とかなり小さいため、分布形にはばらつきが見られるものの、全体的には海象条件ごとに一定の分布形状が存在すると思われ、それらは左右対称の場合および左右非対称で右側および左側に偏った場合の3つのパターンに分類されよう。(a) に示される線形波に近い波浪の発生期の風波の場合には、分布形は左右対称となっており、(e) に示されるコスタリカのカルデラ港において観測された顕著な波群を有する波浪⁹⁾の場合もこのパターンに属する。また、(b) および (c) のような強風下における波浪の発達および最盛期には分布形は左右非対称で右側に偏っている。さらに、(d) に示されるうねり性波浪のような波浪の減衰期においては左右非対称で左側に偏った分布形をしている。これらより、波浪ソリトン群の固有値分布は単に統計的な分布であるだけでなく、波浪の持つ力学的構造に対応した分布であると言えよう。

このように分類された固有値分布は、波浪の伝播において良く保存されている。特に、N2608 のケースを除いて、一様水深でかつ砕波を含まない測点の間においては、分布形にほとんど変化は見られず、これは N2808 のうねり性波浪の場合にもっとも顕著である。ここでは

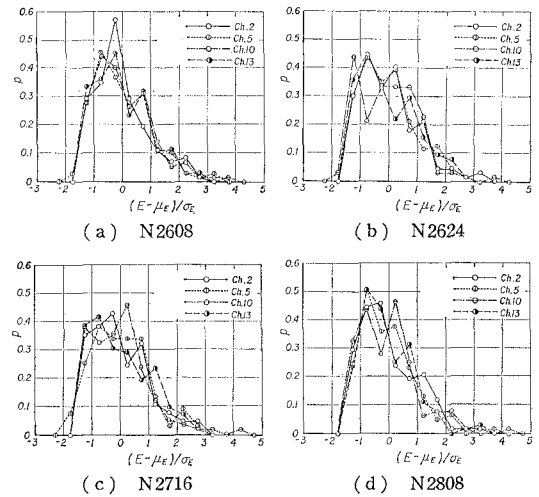


図-6 波浪ソリトン群のエネルギー分布の空間変化

各測点における波形から直接的に個々のソリトンの対応を見つけることはできなかったが、もしこの対応がつけば、各ソリトンの伝播に伴う保存性も明らかになると思われる。さらに興味深いことは、浅水および砕波変形を含む Chs. 10 および 13 の間においてさえ固有値分布があまり変化していないことであろう。紙面の関係で割愛したが、これは波別解析法による波高分布との大きな相違点である。これらより、浅海での波浪の伝播においては、ソリトンモードのような力学的構造が支配的になっていると考えられる。

ついで、次式で定義されるソリトン群のエネルギー E をその平均値 μ_E および標準偏差 σ_E で規準化した確率変数の分布を図-6 に示す。

$$E = \kappa A^{2/3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 κ ；比例定数である。これより、規準化されたソリトンのエネルギー分布は、固有値分布の場合と異なり、一定の分布形を有することがわかる。

(2) ソリトン群に関する砕波限界

波浪ソリトン群は孤立波の連なりとして表示することができ、このとき波谷面は平均海面に一致する。孤立波の最高波に関する研究はこれまで数多くなされており、特に山田ら⁹⁾が提案した次式の無次元化された最高波の波高が一般に認められている。

$$H_{\max}/h = 0.8262 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $H_{\max}$ ；最高波の波高および h ；水深である。しかしながら、孤立波に関するこの種の研究では、規則波としての最高波を示しているにすぎず、現実の不規則波浪にそのままその結果を用いるのは不適当であると思われる。表-2 は、図-5 から求めたソリトン群の砕波状況を示したものであり、 A^* ；砕波時における無次元化された固有値、 $4A^*$ ； A^* の幅および σ_A^* ；無次元化され

表-2 波浪ソリトン群に関する碎波状況

Data No.	Channel	$A_0^* = A_0/h$	ΔA_0^*	σ_{A^*}
N2624	Ch.10	0.325 - 0.425	0.110	0.065
	Ch.13	0.425 - 0.475	0.05	0.124
N2716	Ch.10	0.325 - 0.475	0.115	0.066
	Ch.13	0.375 - 0.425	0.05	0.101
N2808	Ch.13	0.325 - 0.525	0.20	0.092

た固有値の標準偏差である。ソリトンとしての碎波限界波高は、式(2)による値に比べかなり小さな値となっており、規則波と不規則波のこのような相違は、合田¹⁾や Thornton および Guza²⁾の研究においても指摘されている。しかしながら、表中の値はこれらの研究と比較してもなお小さい。その原因としては風および海底勾配の影響が考えられ、今後碎波指標を検討する際にはこれらをパラメータとして考慮する必要がある。またこの表より、波高分布における碎波限界としての固有値はある幅を持っており、この幅は碎波が最初に観測されたより沖側の測点において広がることからわかる。さらに、標準偏差は碎波が発生した測点より岸へ近づくにつれて増加する傾向が見られる。これは、碎波の進行とともに波高の大きな波が消滅し、一旦は分布形が狭くなるものの、その後碎波による再生波の影響により固有値分布の拡がりが大きくなるためであると思われる。

(3) 統計量の時空間変化

図-7 は、沖波波高と各測点での波高の比の観測浅橋に沿う変化であり、海底地形もあわせて示してある。沖波波高としては、沖側測点 Ch. 2 における波高の平均値を用いており、 $\bar{A}_0$ および $\bar{H}_0$ はそれぞれ Ch. 2 におけるソリトンの固有値およびゼロアップクロス波高の平均値である。また、 $\bar{A}$ および $\bar{H}$ はそれぞれ各測点におけるそれらの平均値である。これより、ソリトンモードによる表示の場合には、ゼロアップクロス法による場合に比べ、波浪の伝播に伴う固有値の平均値の変化が非常

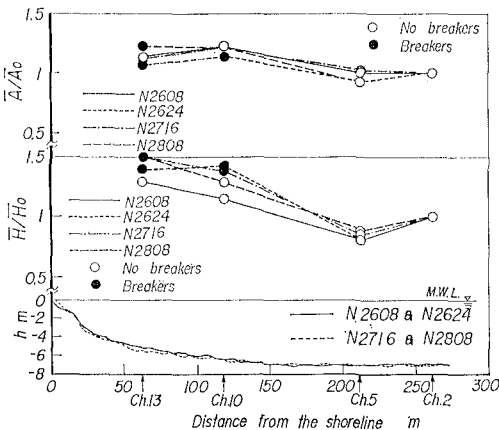


図-7 沖波平均波高比の時空間変化

に小さく、浅水化および碎波の影響をあまり受けないことがわかる。また、固有値の平均値は、一様水深である Ch. 2 から Ch. 5 の間ではほとんど変化せず、傾斜海岸である Ch. 5 から Ch. 10 の間では浅水化によって波高が一定の割合で増大する傾向が見られ、海底地形と波高とが正確に対応している様子がうかがえる。さらに、Ch. 10 から Ch. 13 の間において、碎波による波高の減衰が認められるが、その変化は小さく、ソリトンによって波浪を表示した場合にはその伝播に伴う固有値の変化は主として水深に依存するものと思われる。これに対して、ゼロアップクロス法による場合には、Ch. 2 から Ch. 5 の間において一様水深でかつ碎波を含まないにもかかわらず、平均波高は約 20% も減少している。また、Ch. 5 から Ch. 10 の間においてソリトンの場合浅水化による固有値の変化の割合が一定であるのに対して、ゼロアップクロス法による場合には波高変化に一定の傾向は見られない。それゆえ、ゼロアップクロス法のような波別解析法によって不規則波浪の巨視特性を推定することは若干問題があると思われる。以上より、ソリトンの固有値の平均値は、その分布と同様に、統計量として優れた性質を持っており、波浪ソリトン群の巨視特性を正確に反映することのできる物理量であると言えよう。

図-8 は、非線形性パラメータである Ursell 数の空間的变化を示す。ここに、 U_r は次式で定義されるソリトンモードによる Ursell 数である。

$$U_r = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(A_j - \mu_A)}{\sigma_A} \left\{ \frac{(T_j - \mu_T)}{\sigma_T} \right\}^2 \dots (3)$$

比較的風速の小さい N2608 および N2808 のケースについては、あたかも海底形状に沿うかのように、水深の減少にともない U_r 数は増加している。N2624 および N2716 のケースにおいても同様な傾向が現われているが、 U_r 数は多少ばらついた値を示しており、これは強風および碎波の影響によると思われる。また、図-4 で示したように、ソリトンモードによる波形表示の適用性は、 U_r 数がおおよそ 10 以上となる N2624, N2716 およ

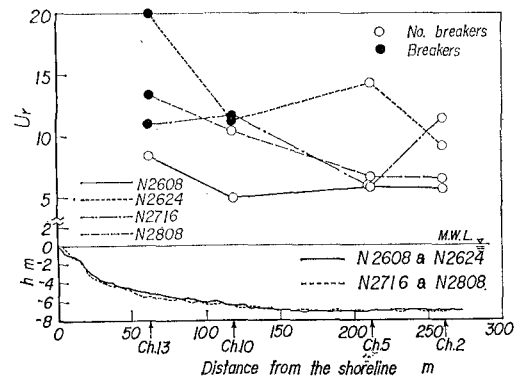
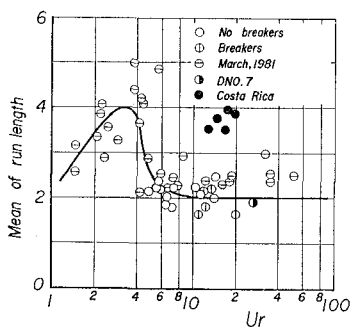


図-8 Ursell 数の時空間変化



図—9 Ursell 数とソリトン固有値に関する平均連長との関係

び N2808 のケースにおいて最も良好である。このように波形表示についてだけ着目した場合には、うねり性波浪に対してのみ適用可能であると考ええるよりも、むしろうねりや風波を問わずに、 $Ur \geq 10$ の波浪を波浪ソリトン群として扱うのが実用的であると思われる。図—9 は、ソリトンの固有値に関する Ur 数と平均連長との関係を示したものであり、連長は固有値の平均値を超える連を用いて定義されている。なお、ここでは 1981 年 3 月に大湊海岸において得られた結果⁷⁾、DNO7⁸⁾ および前述のコスタリカにおける結果もあわせて示してある。また、図中の実線は、全体的な傾向を示すものである。さらに、1981 年 3 月のデータでは、ピーク周波数以上の高周波成分を除去した波形に関するゼロアップクロス波高の Ur 数および平均連長が求められており、ソリトンモードによる方法で解析されたその他の結果とは直接比較できないかもしれないが、波浪ソリトン群として波形を表示した場合、自ずと高周波成分が除去されることになると考えられるので、ここではこれらのデータが同じ条件で解析されたものとして議論を進める。この図より、 Ur 数を用いて波浪の持つ非線形性を 3 つの領域に分類することができるとと思われる。 $Ur \geq 4$ の弱い非線形性の領域では、非線形性の増大に伴い波群が形成され、平均連長も大きくなる。また、 $4 \leq Ur < 10$ の過渡的な領域では、ある程度非線形性が大きくなると波群構造が崩壊し始め、これに伴い波の粒子性が強くなり、平均連長も小さくなる。さらに、 $Ur \geq 10$ の強い非線形性の領域では、ほぼ完全に波群構造は崩壊し、非線形性の強弱にかかわらずもはや平均連長そのものは変化しない。このように波群束縛が存在せず、隣り合う波高の相関がゼロ

の場合、平均連長は理論的に 2 となるが、図からも 2 に漸近する様子がうかがえる。なお、コスタリカにおけるデータは他に比べたいへん大きな平均連長となっている。これは、大湊海岸における海底勾配が約 1/40 であるのに対し、コスタリカでは約 1/500 と非常に小さいことから、非線形性が強い場合でも、ゆるやかな海底勾配の場合には波群が壊されにくいためであると考えられる。すなわち、波群の崩壊は非線形性のみならず、海底勾配の影響も強く受けることが推測できる。

図—4、8 および 9 に示したように、ソリトンモードによる波浪の表示の適用性は、 $Ur \geq 10$ の強い非線形性の領域において最も良いと思われる。すなわち、この領域における波浪は、弱い非線形性の領域に比べ、波浪ソリトン群としてのコヒーレントな構造を有していると判断できる。

5. 結 語

以上、砕波帯の比較的広範な海象条件における波浪を波浪ソリトン群として表示することにより、砕波を含むほぼすべての非線形不規則波浪に対して、この表示法が有効であることを明らかにするとともに、波浪ソリトン群に関する統計量を用いて波浪の伝播に伴う浅水および砕波変形の特徴を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) Goda, Y.: Irregular wave deformation in the surf zone, Coast. Eng. Japan, Vol. 18, 1975, pp. 13~26.
- 2) Thornton, E. B. and R. T. Guza: Transformation of wave height distribution, Jour. Geophys. Res., Vol. 88, pp. 5925~5938.
- 3) 土屋義人・安田孝志・篠田成郎: ソリトンスペクトル理論による海岸波浪の統計的特性, 第 30 回海岸工学講演会論文集, 1983, pp. 69~73.
- 4) 土屋義人・安田孝志・篠田成郎: ソリトンモードに基づく不規則波浪の統計量の保存性, 第 31 回海岸工学講演会論文集, 1984, pp. 178~182.
- 5) Goda, Y.: Analysis of wave grouping and spectra of long-travelled swell, Rep. Port and Harb. Res. Inst., Vol. 22, No. 1, 1983, pp. 3~41.
- 6) Yamada, H., G. Kimura and J. Okabe: Precise determination of the solitary wave of extreme height on water of a uniform depth, Rep. Res. Inst. Applied Mech., Kyushu Univ., Vol. XVI, No. 52, 1968, pp. 15~32.
- 7) 土屋義人・安田孝志・山下隆男・平本高志: 海岸波浪の非線形性と波群構造, 第 31 回海岸工学講演会論文集, 1984, pp. 168~172.