

うねりの統計的性質に及ぼす非線形干渉の影響

岐阜大学 正会員 安田孝志 学生員 ○伊藤一教

1. はじめに ここでは, Dommermuth-Yue (D-Y) の手法¹⁾によって非回転波動に対する基礎方程式を高精度で解き, うねりの統計的性質に及ぼす非線形干渉の影響を流体力学的厳密さをもって明らかにしたい。

2. 計算手法 非線形干渉の影響を正しく評価するため, 上述のD-Yの手法を用いて, 非回転流体力学の基礎方程式を疑似スペクトル法によって任意のオーダーの非線形干渉まで考慮して解くことにする。

3. 数値解の精度 まず, 初期波をストークス波の厳密解によって与え, その時間発展波形を厳密解 η_e と数値解 η_n の間で比較し, 次式で定義される最大絶対誤差 $\epsilon = [\eta_e - \eta_n]_{\max}$ によって数値解の精度を評価した。表-1は, 各初期波に対する $l/T=100$ における誤差を示すが, 誤差は無視できるオーダーであり, 数値解は厳密と言える。ついで, 厳密解が存在しない不規則波に対しても有用な精度指標として, 初期波の全エネルギー $E(0)$ に対する各時間における全エネルギー $E(t)$ の誤差を $E = |1 - E(t)/E(0)| \times 100$ (%)と定義し, E の時間変化について検討する。図-1は, $kh=1$ の下で ka を0.08, 0.13及び0.17と変化させ, それぞれに対して初期波を厳密解によって与え, それに対する誤差 E の時間変化を示したものである。これから, 100周期分進んだ後も $ka=0.17$ のような大振幅の波でも誤差は高々0.35%に留まっており, 数値解は十分な精度を持つと判断される。

表-1 数値解の最大絶対誤差

ka	kb	N	N	l/T	ϵ
0.08	1	3	18	100	0.001
0.13	1	3	18	100	0.009
0.17	1	8	16	100	0.009

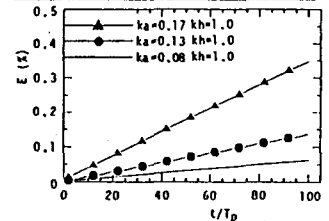


図-1 数値解の精度

4. 統計的性質に及ぼす非線形干渉の影響 初期波をWallips型スペク

トルを持つ不規則波($k_p a = 0.1$, $k_p h = 3$, およびバンド幅パラメータ $m = 15, 30$, ただし, a はゼロガウス変位した波高の $1/2$ である。)として与える。

図-2(a)は, $m=15$ の場合の不規則波の各時間での波形を示し, 図-2(b)は, 比較のために同じ波を線形波動場で伝播させたものである。図-2(b)から, 波群現象を線形波動場での位相の組み合わせによる線形変調として説明することはできるが, 波群自体は緩やかなものに留まっている。これに対し, 図-2(a)の波形は線形変調によるものと異なり, いわゆる'Freak Wave'と呼ばれる高波の発達が顕著となっている。図-3は, 前述の図-2に見られた波群をGF(Groupiness Factor)によって評価し, その時間発展にともなう変動を示したものである。太線で示される $m=15$ の場合については, GFの変動は線形波動場におけるものとはほぼ対応し, 非線形干渉の影響は $l/T_p=20$ 付近において瞬間的に顕れるだけであり, 非線形干渉の影響は $k_p a=0.1$ 程度の振幅ではあまり顕れて来ないことがわかる。これに対し, 細線で示される $m=30$ の場合では, 非線形干渉の影響が時間発展の全段階で顕れ, 狭帯化とともに非線形干渉の影響による波群の発達がより顕著となることがわかる。このような波群の発達が変調不安定によるものであることを示すため, 波数スペクトルのピーク波数成分(k_p)及びその側帯波成分($(1 \pm k_p a) k_p$)の波数スペクトルのパワーの時間発展に伴う変動を示したものが図-4である。これから, 前述の図-3において $m=15$ では $l/T_p=20$ 付近, また $m=30$ では $l/T_p=30$ 付近でGFが極大化を示し, 波群の発達が顕著であったが, これらの時刻においていずれの場合もピーク波数成分と側帯波成分の間で波数スペクトルのパワーに逆転が見られ, 側帯波成分に変調不安定が生じていることがわかる。以上より, 少なくとも $m=30$ の狭帯域スペクトルを持つ不規則波においては, 波群現象の主原因は変調不安定にあることが明らかとなった。しかし, $m=15$ 程度までスペクトルが広帯域になって来ると, $k_p a=0.1$ 程度の比較的小振幅の波では変調不安定の影響は瞬間的なものに留まり, この場合の波群現象は線形変調によって解明できる。

ところで, 波群現象は主として高波の連なりとして捉えられ, 時系列特性として関心が持たれてきたが, 海岸工学的には代表波高間の関係に大きな影響を与えるものとして重要である。図-5はこのことを示したものであり, $m=15$ 及び30のいずれの場合も, 保存系の下では $H_{1/3}$ はほとんど変化せず, 線形波との差もほとんど

ど無視できる程度である。これに対し、 H_{max} についてみると、線形波の場合を含めて著しい変動が見られるようになる。線形波の変動は図中で $\leftarrow$ と示した $Ex(H_{max}/\eta_{rms}) \pm \sigma$ の統計的変動の範囲内に留まっているが、非線形干渉を考慮した場合にはその範囲を大きく越えるようになり、特にその傾向は $m=30$ において著しい。このことは、これまで設計波高の算定において用いられてきた関係 $H_{max}/H_{1/3}=1.6 \sim 2.0$ に対して大幅な修正が必要となることを示すものであり、今後、大水深域の開発の進展に伴ってこの問題は重要となって来るものと考えられる。

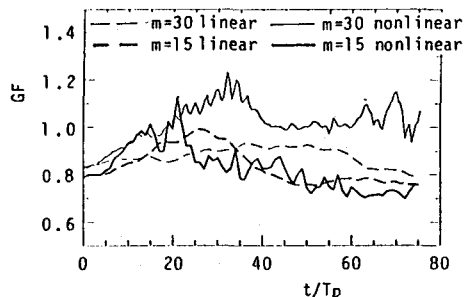


図-3 GFの時間発展

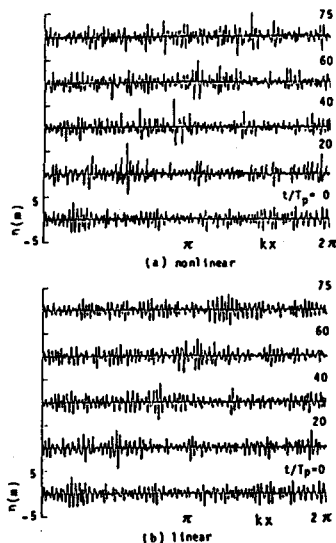
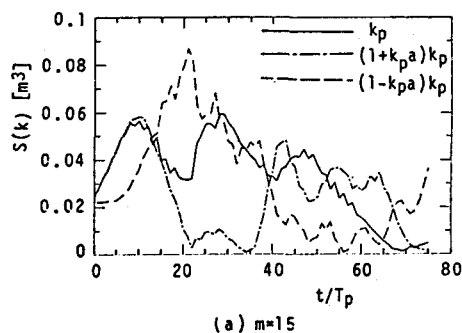
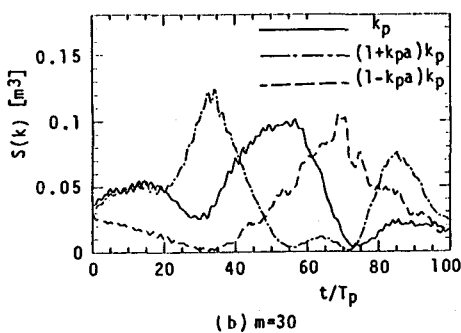


図-2 波形の時間発展 $m=15$

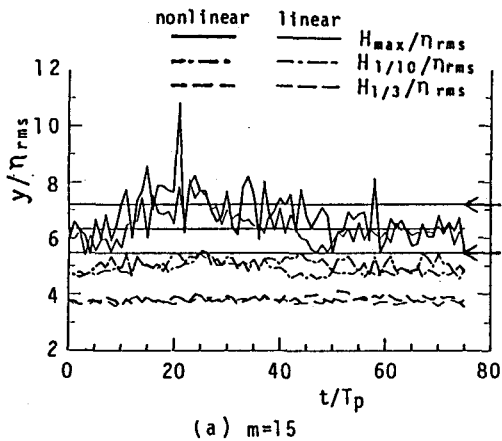


(a) $m=15$

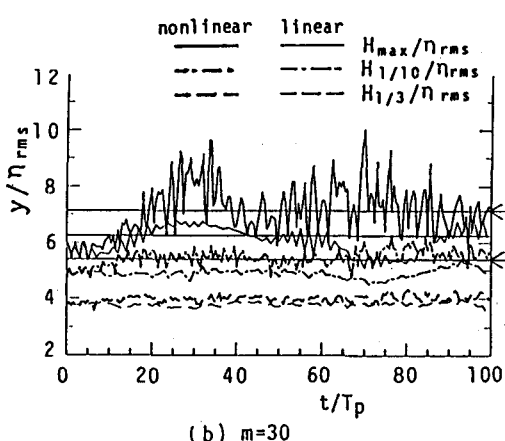


(b) $m=30$

図-4 振幅変調の時間変化



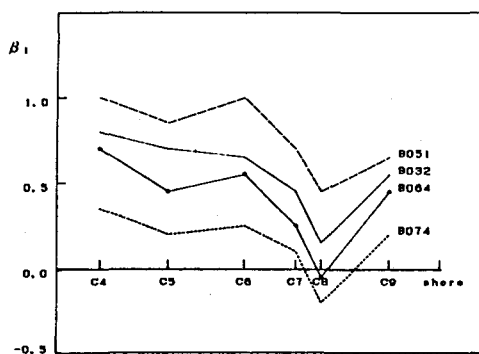
(a) $m=15$



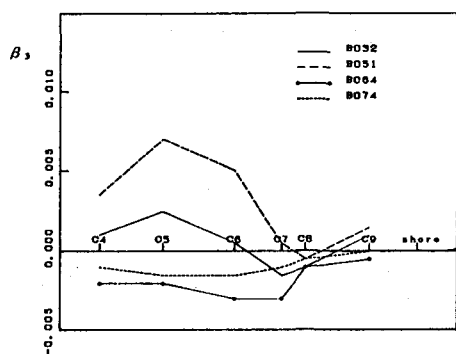
(b) $m=30$

図-5 ゼロダウン統計量の時間変化

参考文献 1) Dommermuth & Yue: J. F. M., 184, 267-288, 1987.



(a) 歪み度



(b) 前傾度

図-1 観測波の歪み度および前傾度の栈橋に沿った変化

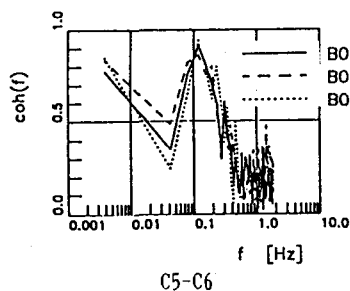


図-2 観測波のコヒーレンス

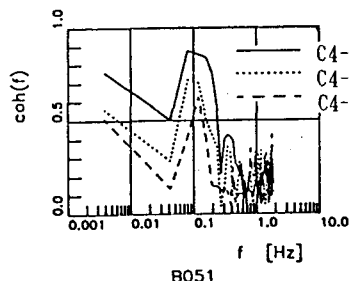


図-3 コヒーレンスの空間分布

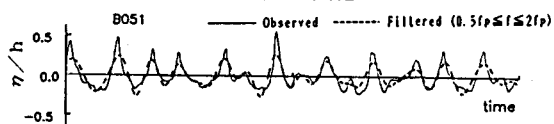


図-4 実測波形とフィルター処理波形との比較 [B051]

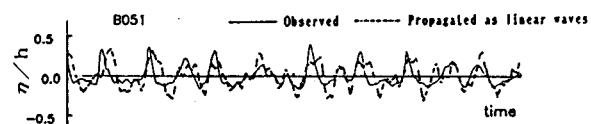


図-6 統計伝播波形と実測波形との比較 [B051]

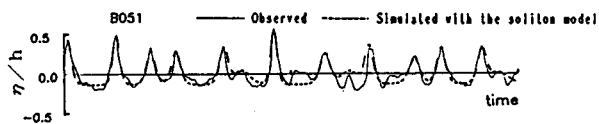


図-7 実測波形とソリトンモデル波形との比較 [B051]

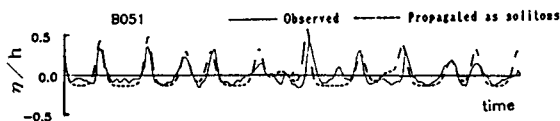
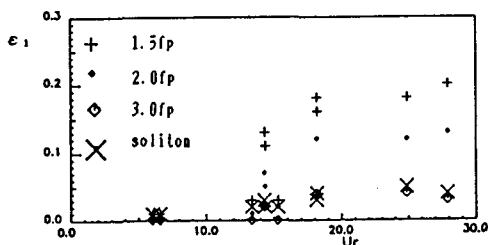
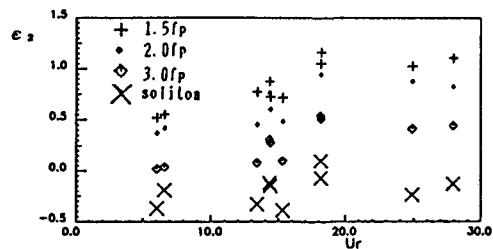


図-8 ソリトン伝播波形と実測波形との比較 [B051]



(a) $\epsilon_1 = \langle (\eta_{ob} - \eta_{t11})^2 \rangle$



(b) $\epsilon_2 = (B_1)_{ob} - (B_1)_{t11}$

図-5 ハイカットフィルターによる波形の歪み誤差