

時間的に変化する波浪の造波とその解析

平山克也*・平石哲也**・細谷徳男***

1. ま え が き

有義波や最大波などの統計量および周波数-波向平面における波のエネルギー分布を表す方向スペクトルは、いずれも静的な港湾・海岸構造物の設計外力を算定する概念として不可欠である。海の波を記述するこれらの概念は不規則な波が統計的には定常であることを前提としている。しかしながら実現現象としての波浪は、例えば暴風時には、波高、周期および波向などの波浪諸元が比較的短時間のうちにかつ連続的に変化する。したがって、一時化の間に観測される波浪の一つの外力条件とした場合、それは統計的に非定常であると捉えることができる。

このような考え方は今後、動的な設計対象である係留船舶や大型浮体構造物の動揺、海浜地形の変形などのより詳細な検討に役立つものと考えられる。このような波を本研究ではまとめて「非定常波浪」と呼ぶことにする。

本研究では、時間発展型の波浪変形計算やサーペント型造波装置による水理模型実験に適用可能な非定常波浪の造波方法を提案する。さらに、時間軸に沿って周波数を分離することができる Wavelet 変換や、通常、定常波浪場の解析に適用されるスペクトル法を用いて、造波された非定常波浪に対する遷移過程の解析を試みる。

2. 非定常波浪の捉え方

(1) 非定常波浪の造波概念

成分波の重ね合わせとして表される多方向不規則波は、一定期間ごとのある短い時間に観測される海の波の波形が、定常とみなせることを前提としている。そこで、非定常波浪を近似的に表現する最も簡単な方法として、定常な波浪場を表す方向スペクトルを時間軸に沿って並べ、それらを連続的に造波する方法が考えられる。これは、ある期間ごとに波形の母集団が変化することに対応する。

このような考え方に基づいたサーペント型造波装置の制御方法が開発されている (Hiraishi ら, 1998)。ここで

は、異なる母集団に属する波形をいかに滑らかに接続するかということが最も重要な課題である。

図-1 は、定常な波浪である波高 $H=5\text{ cm}$ 、周期 $T=1.0\text{ s}$ および波高 $H=5\text{ cm}$ 、周期 $T=1.5\text{ s}$ の規則波の振幅を、5 s 間の移行期間内にそれぞれ点線のように線形に減少または増加させ、両者の合成により移行期間内の波形が実線のように得られることを示している。移行期間内に造波される波は、移行期間前後の波の位相関係、あるいは移行期間の長さによって、さまざまに変化することが容易に推測される。さらに多方向不規則波では、成分波間の位相関係によって非常に大きな振幅を生ずる危険性がある。

そこで本研究では、多方向不規則波を構成する個々の成分波の振幅、周波数および波向を、振幅や周波数が変動する電波の考え方をを用いて、それぞれ連続的に変化させることにより非定常波浪を造波する。図-2 は、図-1 と同じ条件で後述する電波の発生理論のうち FM 方式を用いて造波したものである。この方法では、移行期間内における振幅を変動させずにつぎの定常波浪へ滑らかに移行させることが可能である。このように造波される非定常波浪を本研究では“Transient Wave”と定義する。

(2) 通信工学における電波の理論

通信工学においては、情報伝達を行う手段として電波

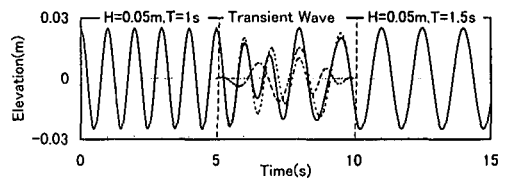


図-1 定常波浪を線形的に移行させた場合の造波波形

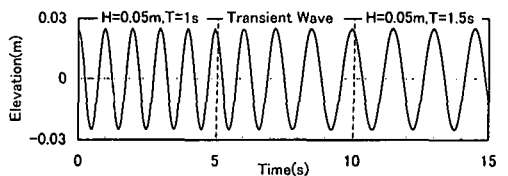


図-2 FM 波の理論を用いて移行させた場合の造波波形

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長
*** 工修 三井造船(株)

を用いる。波形に情報を乗せる方法の違いから、電波はおおよそ AM 波、FM 波、PM 波に分類されている（例えば、福田，1999）。AM 波では、情報は波形の振幅の変動として伝えられ、情報を搬送する波の周期や位相は変化しない。すなわち、信号 $x(t)$ を伝送する AM 波 $x_c(t)$ は、搬送波の振幅を A_c 、各速度を ω_c 、初期位相を ε_c とすると (1) 式のように表される。ここに k は 1 以下の正定数で変調指数と呼ばれる。また信号 $x(t)$ は周期関数である。このような通信方式を振幅変調通信方式という。一方、FM 波および PM 波では、情報は波形の周波数変動や位相変動として伝えられ、波形の振幅は一定である。すなわち、信号を伝送する FM 波は、搬送波の周波数を $f_c = \omega_c / 2\pi$ とすると (2) 式のように表される。ここに f_d は周波数偏移と呼ばれる。FM 波の周波数 $f(t)$ は瞬時周波数として定義され、搬送波周波数と瞬時周波数偏移の和として (3) 式のように表される。また PM 波は、周波数を変化させる代わりに伝送する信号に応じて位相を変化させるものであり (4) 式のように表される。ここに ϕ_d は搬送波 $A_c \cos \omega_c t$ からの最大位相偏移であり、 $\phi_d \leq \pi$ という制限がある。FM 波と PM 波には密接な関係があり、ともに角度変調通信方式に分類される。

$$\text{AM 波: } x_c(t) = A_c \{1 + kx(t)\} \cos(\omega_c t + \varepsilon_c) \cdots \cdots (1)$$

$$\text{FM 波: } x_c(t) = A_c \cos \left\{ \omega_c t + 2\pi f_d \int_0^t x(\lambda) d\lambda \right\} \cdots \cdots (2)$$

$$f(t) = f_c + f_d x(t) \cdots \cdots (3)$$

$$\text{PM 波: } x_c(t) = A_c \cos \{ \omega_c t + \phi_d x(t) \} \cdots \cdots (4)$$

3. 非定常波浪の造波

(1) 振幅と周波数が時間的に変化する波の造波方法

電波の発生理論をもとに、規則波の振幅と周波数が時間的に変化する水面波の定式化を試みる。振幅変化の記述に (1) 式を、周波数変化の記述に (2) 式を適用し、それらの移行期間前後の位相の整合性を満たすために導入する位相変化の記述に (4) 式を用いる。また信号 $x(t)$ には、移行期間前後の波の振幅、周波数および位相を滑らかに接続する一次関数を用いる。すると一次元水路における Transient Wave は (5)～(8) 式のように表される。ここで、 t_1 、 t_2 は移行期間の開始時刻および終了時刻であり、その他の添え字 1, 2 は、それぞれ移行期間前後の変量であることを示す。波数 k は (7) 式に示す瞬時周波数ごとに分散関係式が成り立つとして与えた。また (8) 式では、 ε_1 から ε_2 への位相の変化量がより小さくなり、かつ、移行期間終了時の Transient Wave の位相が移行期間後の波の初期位相 ε_2 に等しくなるような操作を行う。

$$\eta(t) = a(t) \cos \left\{ kx - 2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau + \varepsilon(t) \right\} \cdots \cdots (5)$$

$$a(t) = \begin{cases} a_1 + \frac{a_2 - a_1}{t_2 - t_1}(t - t_1); & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ a_1; & (t < t_1) \quad a_2; \quad (t_2 < t) \end{cases} \cdots \cdots (6)$$

$$f(t) = \begin{cases} f_1 + \frac{f_2 - f_1}{t_2 - t_1}(t - t_1); & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ f_1; & (t < t_1) \quad f_2; \quad (t_2 < t) \end{cases} \cdots \cdots (7)$$

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{t_2 - t_1}(t - t_1); & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ \varepsilon_1; & (t < t_1) \quad \varepsilon_2; \quad (t_2 < t) \end{cases} \cdots \cdots (8)$$

(2) 波向が時間的に変化する波の造波方法

規則波の Transient Wave において、さらに波向を時間的に変化させる場合には、波向を考慮できるように、(5) 式を (9) 式のように書き直した上で、波向変化の記述を (6)～(8) 式にならって (10) 式のように行う。また、(10) 式の適用にあたっては、 θ_1 から θ_2 への位相の変化量がより小さくなるような操作を行う。

$$\begin{cases} \eta(t) = a(t) \cos \left\{ kx(t) - 2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau + \varepsilon(t) \right\} \cdots \cdots (9) \\ r(t) = x \cos \theta(t) + y \sin \theta(t) \end{cases}$$

$$\theta(t) = \begin{cases} \theta_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}(t - t_1); & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ \theta_1; & (t < t_1) \quad \theta_2; \quad (t_2 < t) \end{cases} \cdots \cdots (10)$$

(3) 一次元水路における非定常波浪の造波

ここで定式化した (5)～(8) 式を用いて、規則波と不規則波の Transient Wave を造波水路および断面二次元のブシネスクモデル (Madsen ら, 1992) を用いた数値波動水槽で造波し、水路内を伝播する Transient Wave の波形を観察した。実験に用いた造波水路を図-3 に示す。水深は 50 cm 一定とした。一方、数値波動水槽では、図-3 の水路を $\Delta x = 0.1$ m の格子に分割し、岸側にはエネルギー吸収帯を設置した。また差分時間は $\Delta t = 0.025$ s とした。

水理実験と数値計算に共通の造波ケースを表-1 に示す。微小振幅波および有限振幅波の理論の適用限界 (岩垣, 1987) によると、波高が 0.03 m のときは、周期が 1.0～2.0 s の波は微小振幅波となり、波高が 0.06 m のときは、周期が 1.0～2.0 s の波はストークス波となる。

振幅のみが変化する Transient Wave の伝達波の実験波形と数値計算で得られた波形を重ねて図-4 に示す。Transient Wave が水路内を伝播するにつれて、図-4 (a) は微小振幅波からストークス波へ、図-4 (b) はストークス波から微小振幅波へ遷移するケースであるが、図-4 (a), (b) に示した各地点で観測される伝達波形は、振幅が線形に増加または減少していることを除いて互いにはほぼ同様であり、微小振幅波とストークス波にみられる若干の波速の違いが伝達波形に与える影響はほとんどみられない。なお、伝達波形のうち初期の波形は、造波

された波が浅海波であることにより、波速と波エネルギーの伝播速度が異なるために生じるものである。

周波数のみが変化する Transient Wave の伝達波の実験波形と数値波動水槽で得られた波形を重ねて図-5 に示す。Transient Wave が水路内を伝播するとき、図-5 (a) では、周期が増加するにつれて波速が増加し、あとから造波された波がまえの波に追いつくために、ある地点で極大波が生じているようすが観察される。一方、図-5 (b) では、あとから造波された波の波速がまえの波よりも遅いために、波形は伝播するにつれて変形していくが、伝達波相互の位相が一致する現象はみられない。

ところで、水面波の伝播波形を伝送される電波と比較すると、図-4 は AM 波に、図-5 は FM 波に対応する。しかしながら、信号を波形として伝送し復調器によって信号を再び取り出せる電波とは異なり、水路を伝播する波形は、自由境界を有する水面波の性質上、いずれのケースも造波装置で発生させた波形を保持しない。したがって、ある地点で観測された伝播波形から造波波形を再現するためには、Transient Wave が伝播されてきた方向およびその伝播距離を知る必要がある。

一方で、水理実験で得られた Transient Wave の伝達波形は、数値波動水槽を用いた数値計算によって非常に精度よく再現されることがわかった。

つぎに、一方向不規則波の移行期間における実験波形を計算結果とともに図-6 に示す。規則波と同様、両者の

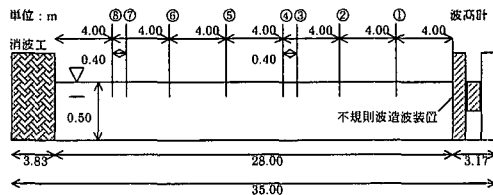
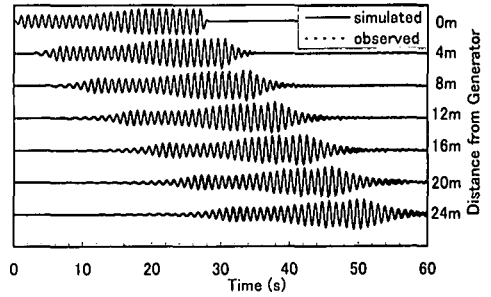


図-3 造波水路と波高計配置

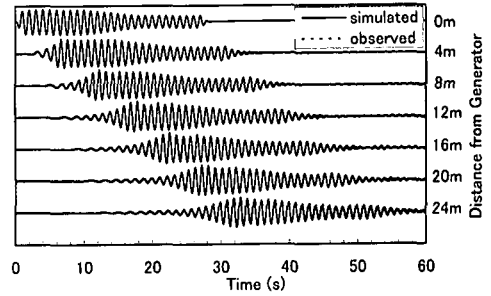
表-1 不規則波造波装置による造波実験ケース

Depth: $h=0.5\text{ m}$ const. Sampling Time: $\Delta t=0.05\text{ s}$

造波 Case	波の種類	成分波数	波況条件-1				移行時間 (s)	波況条件-2			
			$H(\text{m})$	$T(\text{s})$	初期位相	造波時間 (s)		$H(\text{m})$	$T(\text{s})$	初期位相	造波時間 (s)
reg1001	規則波	1	0.03	1.0	0	10	8	0.06	1.0	0	10
reg1002	規則波	1	0.03	1.0	0	10	8	0.03	2.0	0	10
reg1003	規則波	1	0.03	1.0	0	10	8	0.06	2.0	0	10
reg1004	規則波	1	0.06	1.0	0	10	8	0.03	1.0	0	10
reg1005	規則波	1	0.03	2.0	0	10	8	0.03	1.0	0	10
reg1006	規則波	1	0.06	2.0	0	10	8	0.03	1.0	0	10
srg1001	二波分波	2	0.03	1.0	0	10	8	0.03	2.0	0	10
			0.03	2.0	0			0.03	1.0	0	
srg1002	二波分波	2	0.03	1.0	0	10	8	0.06	2.0	0	10
			0.06	2.0	0			0.03	1.0	0	
irr1001	不規則波	128	0.03	1.0	3 波群	120	120	0.03	2.0	3 波群	120
irr1002	不規則波	256	0.03	1.0	3 波群	120	120	0.03	2.0	3 波群	120
irr1003	不規則波	512	0.03	1.0	3 波群	120	120	0.03	2.0	3 波群	120
irr1004	不規則波	128	0.03	2.0	3 波群	120	120	0.03	1.0	3 波群	120
irr1005	不規則波	256	0.03	2.0	3 波群	120	120	0.03	1.0	3 波群	120
irr1006	不規則波	512	0.03	2.0	3 波群	120	120	0.03	1.0	3 波群	120

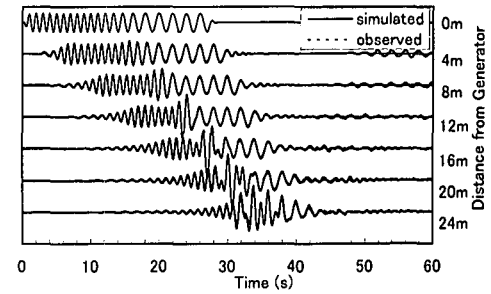


(a) 振幅が増加する場合 (Case; reg 1001)

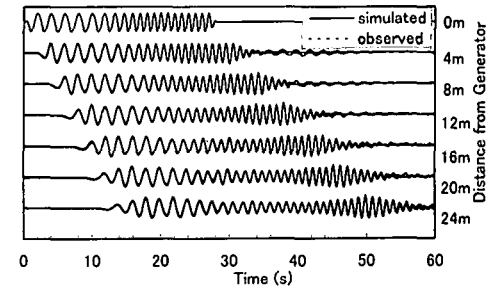


(b) 振幅が減少する場合 (Case; reg 1004)

図-4 規則波の Transient Wave (振幅のみ変化)



(a) 周波数が減少する場合 (Case; reg 1002)



(b) 周波数が増加する場合 (Case; reg 1005)

図-5 規則波の Transient Wave (周波数のみ変化)

波形は非常によく一致した。一方向不規則波の Transient Wave は、2つの異なるパワースペクトルをそれぞれ逆フーリエ変換して得られる互いの成分波の組に対し

て(5)～(8)式を適用し、得られた波形を線形に重ね合わせて造波される。この解析結果は次章で示される。

(4) 二次元平面水槽における非定常波浪の造波

平面二次元場における非定常波浪は、振幅や周波数とともに波向が変化する。すでに示した(9)、(10)式を用いることでこのような Transient Wave を造波することが可能である。しかしながら、斜め波が造波できるサーペント型造波装置において実際に Transient Wave を造波するためには、波向を時間的に変化させるための若干の改造を必要とする。現在、運輸省港湾技術研究所所有のデュアル・フェース・サーペントにおいて改造作業を進めているところである。この装置を用いた非定常波浪の造波実験は別の機会に譲ることとし、ここでは(3)で Transient Wave に対する適用性が示された数値波動水槽によって波向が変化する Transient Wave を造波する。図-7に、波高 $H=0.01$ m, 周期 $T=2.0$ s の規則波の波向が、15 s 間に $-15^\circ \sim +15^\circ$ まで変化する波の造波例を示す。造波境界において斜め波の位相と波向の関係が時々刻々変化するために、波峰線が曲線となるようすが観察される。

多方向不規則波の Transient Wave は、一方向波と同様、2つの異なる方向スペクトルから得られる成分波の組に(9)、(10)式を適用することにより造波される。この解析結果は次章で示される。

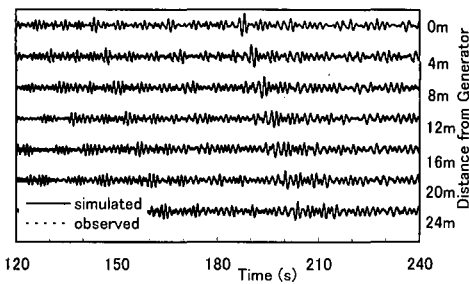


図-6 一方向不規則波の Transient Wave (Case; irr 1001)

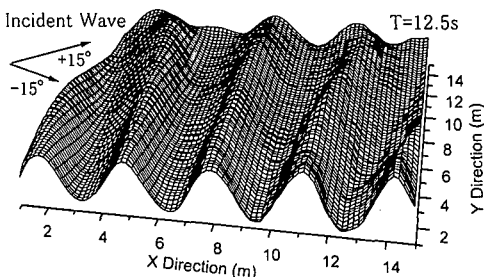


図-7 波向きが変化する規則波の Transient Wave

4. 非定常波浪の解析方法

(1) Wavelet 解析

Wavelet 解析とは、Wavelet 変換という多段階フィルタにより時間波形を複数の周波数帯に分離する時間周波数解析である。Wavelet 変換は信号(波形)を Wavelet (小さな波)によって切り出す作業に相当する。波浪データを対象とした Wavelet 解析は、森・安田(1996)や小林・高橋(1994)の研究などにみられる。また仲座ら(1995)は Wavelet 変換を Wavelet フィルタバンクによるデータ解析として解釈し、成分波形の抽出を行っている。

本研究では、Wavelet 変換を用いて Transient Wave の振幅や周波数の遷移過程の解析を試みる。離散 Wavelet 変換では、周波数帯に分離する解析の深さを表す Level; j とその中心周波数; f_j , および時間波形の Sampling Time; Δt との間に(11)式のような関係が成り立つ。

$$f_j = 2^j / \Delta t \quad (11)$$

規則波の周波数および振幅が $0 \sim 10$ s で 1.0 Hz と 0.015 m, $18 \sim 28$ s で 0.5 Hz と 0.030 m, $10 \sim 18$ s でそれぞれ線形に変化するように作成された $\Delta t = 0.05$ s の造波信号を、Wavelet 変換により解析した結果を図-8に示す。

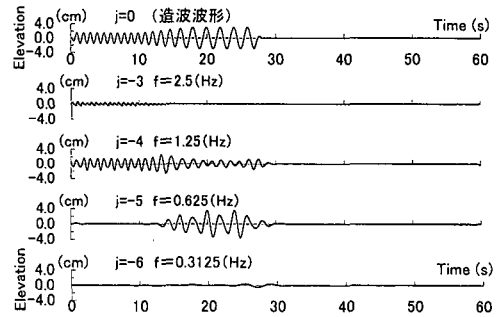


図-8 造波波形 (Case; reg 1003) に対する Wavelet 解析

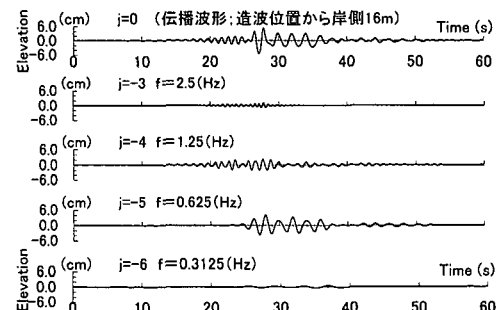


図-9 伝播波形 (Case; reg 1003) に対する Wavelet 解析

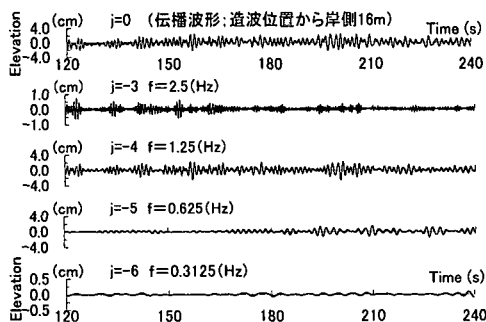
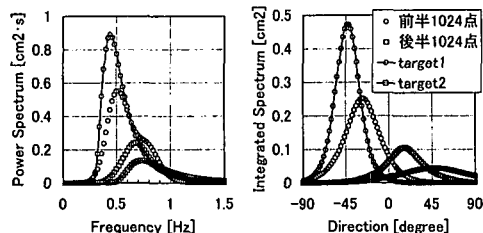


図-10 伝播波形 (Case; irr 1001) に対する Wavelet 解析



(a) 周波数スペクトル (b) 方向スペクトルの積分値

図-11 多方向不規則波の Transient Wave

Level; $j=0$ には解析対象となる時間波形が, Level; $j=-1$ 以下にはそれぞれ対応する周波数帯に含まれる解析波形が示されている. ここで各 Level の周波数帯は, (11) 式から得られる中心周波数およびその近傍の周波数からなる. よって図-8 では, 1.0 Hz の波はおもに Level; $j=-4$ に, 0.5 Hz の波はおもに Level; $j=-5$ に現れ, 1.0 Hz から 0.5 Hz に遷移する Transient Wave はその両方の Level に現れている. これらの波形から時間的に変化する Transient Wave の振幅および周波数を捉えることができる. さらに, このように造波された Transient Wave の伝播波形を解析した結果を図-9 に示す. 各 Level の波形の時間軸上での分布をみることにより, 伝播波形が各周波数帯の波のどのような位相関係によって形成されているかを知ることができる. 逆に, 各 Level の波形を重ねると, Level; $j=0$ に示されたもとの波形を得ることができる.

図-6 で示した一方向不規則波の Transient Wave の伝播波形を解析した結果を図-10 に示す. 伝播波形の有義波周期が 120 s 間に 1.0 s から 2.0 s へ遷移するようすが, Level; $j=-5$ ($f=0.625$ Hz or $T=1.6$ s) における波形が次第に大きくなっていることより推測できる. このように Wavelet 解析では, 観測された波形に含まれる特定の周波数帯における成分波の時間変動を調べることができる.

(2) スペクトル解析法による非定常波浪の解析

平面二次元の数値波動水槽において, 有義波高 $H_{1/3}=$

0.02 m, 有義波周期 $T_{1/3}=2.0$ s, 波向 -45° , 方向集中度 $S_{max}=75$ の多方向不規則波 (target 1) が, 105 s 間にそれぞれ $H_{1/3}=0.01$ m, $T_{1/3}=1.2$ s, 波向 $+45^\circ$, $S_{max}=10$ (target 2) へと移行する Transient Wave を造波した. 水槽内のある一点で観測される多方向不規則波の伝播波形は, それぞれ波向の異なる成分波から構成されており, 現段階ではこの波形に Wavelet 解析を適用することは難しい. そこで今回は, 移行期間に観測された波形 (データ数 2100 点) を前半と後半に分け, それぞれの波形に方向スペクトル解析を適用した. 結果を図-11 に示す. 前半および後半のデータ 1024 点から解析された周波数スペクトルおよび方向スペクトルの周波数積分値は, ともに移行期間前後の多方向不規則波の中間的なスペクトル形状を示すことがわかる. なお, 解析区間の波形を定常とみなすことによる誤差や, 解析データ数の不足がスペクトル形状の推定精度に与える影響などは考慮されていない.

5. 結 論

本研究では, 一つの時化の間に観測される波浪を非定常波浪と定義し, 電波の理論をもとに定式化された Transient Wave を用いて, 非定常波浪の造波方法を提案した. 一次元水路における造波波形および伝播波形の解析には, 時間周波数解析が可能な Wavelet 変換を用いた. 平面場で造波された波向が変化する Transient Wave の解析手法を確立することが今後の課題である. 謝辞: 本研究の一部は, 文部省科学研究費補助金 (基礎研究 (B) (2)) (研究代表者: 高山知司) の補助を受けて行われたものである. ここに記して謝意を表する.

参 考 文 献

- 岩垣雄一 (1987): 最新海岸工学, 森北出版, 250 p.
- 小林智尚・高橋智彦 (1994): Wavelet 変換を用いた実海岸の波群の解析とその再生, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 186-190.
- 仲座栄三・大城真一・都嘉山正光・日野幹雄 (1995): Wavelet 変換による波浪データの解析, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 306-310.
- 福田 明 (1999): 基礎通信工学, 森北出版, 260 p.
- 森 信人・安田孝志 (1996): ウェーブレット解析による波浪の非線形特性の推定, 土木学会論文集, No. 533/II-34, pp. 157-169.
- Hiraishi, T., K., Hirayama and H., Maruyama (1998): Applicability of dual face serpent-type wave generator, Rep. PHRI, Vol. 37, No. 4, pp. 33-35.
- Madsen, P. A. and O. R. Sørensen (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part2. A slowly-varying bathymetry., Proc. 18th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 183-204.