

一方向非定常波浪の造波方法の開発

DEVELOPMENT OF GENERATION PROCEDURES FOR UNIDIRECTIONAL AND UNSTEADY STORMY WAVES

高山知司¹・帯包浩司²・間瀬 肇³

Tomotsuka TAKAYAMA¹, Kouji OBIGANE² and Hajime MASE³

- 1 フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)
 2 正会員 工修 大豊建設(株) 設計部 (〒104-0033 東京都中央区新川1-24-4)
 3 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Small waves at the beginning of a storm are developed as the storm grows up. At the strongest state of the storm the waves reach the maximum and they decrease gradually as the storm decays. Though this variation of the waves during the storm is very important for the reproduction of disastrous phenomena during the storm, it cannot be reproduced in a wave channel by the present wave generation procedures. The present paper proposes a new procedure of unsteady wave generation and confirms the effectiveness of the procedure by the reproduction of storm waves in a wave channel.

Key Words: storm waves, wave generation procedure, unidirectional random waves, unsteady waves

1. まえがき

暴風が発達するに連れて、小さい波高の状態から次第に発達し、暴風の最盛期に最大の波高になる。そして、暴風が減衰するに従って、波浪は次第に小さくなり、元の状態に戻る。このような暴風時における波浪の変化は現行の造波装置では再現することができない。現状の造波機の造波システムでは、不規則波であっても統計的に同じ状態の波、つまり定常状態の波浪しか造波することができない。そのため、海岸・港湾構造物の被災原因を究明するに当たっては、暴風の最盛期における波浪状態を再現し、その波を数100波、多い場合は1000波程度作用させて、構造物が破壊に至る状態を観察されてきた。平均波高が10sの波を考えると、2時間から3時間は統計的に同じ状態の波が来襲することを仮定していることになる。しかしながら、有義波高が2m以上になる状態を暴風として、これの継続時間を調べてみる¹⁾と、太平洋側では暴風の原因が台風のような移動性の低気圧であるために、暴風の半分近くは2時間以内であり、4時間を越えるような暴風は少ない。一方、日本海側では冬季の季節風によって大きな波浪が起こされるために、暴風の継続時間は比較的長い、それでも8時間を越える暴風は少ない。このような暴風であっても最盛期の状態の継続時間はほとんどが1時間から2時間以内である。

以上のような暴風の最盛期での継続時間を考えると、最盛期の波を現地時間で数時間作用させて、構造物の破壊過程を調べることが構造物の被災原因を究明することになるのか疑問である。大きな1波だけの波の作用で破壊過程に至るような被災に対しては、このような実験方法を用いることは許されるが、破壊の進行が一波一波の作用の蓄積として生じるような場合には、過大な破壊過程を再現することになる。後者のような現象としては、防波堤の滑動破壊を含む構造物の変状破壊や暴風時における洗掘や侵食の現象がある。これらの現象は徐々に進行するために、暴風時の波浪を発達期から最盛期、さらに減衰期へと変化するものとして再現し、暴風時の間にどのような状態にまで破壊が進行するのかが明らかにすることが重要となる。このような現象の例としては、9918号台風によって苅田港沖の北九州空港埋立護岸の被災がある。この被災原因については、高橋ら²⁾が実験を行って明らかにしている。それによると、護岸を越波した波によって背後の埋立土砂が取り除かれ、その結果、高潮による水位上昇に伴う衝撃波力に対抗する背後からの土砂の抵抗力がなくなったために破壊に至ったとしている。この実験においても、暴風の最盛期における波浪を用いた実験が行われており、暴風によってどのような破壊にまで到達したかは明確でない。このような暴風時の非定常波浪を造波する手法について平山

ら³⁾が検討しているが、任意の非定常波浪を造波するシステムの開発までには至っていない。

本研究では、暴風時における波浪のような非定常の波浪を水路内に造波するシステムを新たに開発し、その方法の妥当性を検討したものである。妥当性の検証は、新たに開発した方法を用いて実際に実験水路内に造波して、波浪変化を測定し、目標としたものと比較することによって行った。

2. 一方向非定常波浪の造波方法

(1) 任意時刻における波浪スペクトル

暴風時の波浪変化は一般に1時間あるいは2時間といった時間間隔に波浪諸元が与えられる。波浪諸元が与えられると、標準的な周波数スペクトルを用いてその波浪の周波数スペクトルを求めることができる。その標準的なスペクトルは次式のようなものがある。

Bretschneider・光易スペクトル：

$$S(f) = 0.312 H_{1/3}^2 T_p (T_p f)^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \quad (1)$$

ここに、 $S(f)$ と f はそれぞれ波の周波数スペクトルと周波数であり、 $T_p (= 1/f_p)$ は周波数スペクトルのピーク周期で、有義波周期と次式のような関係がある。

$$T_p = 1.05 T_{1/3} \quad (2)$$

また、 $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ はそれぞれ有義波の波高と周期を示している。

JONSWAP スペクトル：

$$S(f) = \alpha H_{1/3}^2 T_p (T_p f)^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \times \gamma \exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2] \quad (3)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{0.0624}{[0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}]} \quad (4)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a: f \leq f_p \\ \sigma_b: f > f_p \end{cases} \quad (5)$$

γ は、周波数スペクトルのピーク値の標準値に対する倍率を示しており、通常1～7であるが、3.3がよく用いられる。さらに、 σ_a や σ_b はスペクトルの増大範囲を示すパラメーターである。

JONSWAP スペクトルは発達途中の波浪によく適合するスペクトルと言われている。式(2)のスペクトル形は有義波の諸元で表示できるように合田⁴⁾によって修正されたものである。

有義波周期とスペクトルのピーク周期との関係を示す式(2)は、合田が観測値から求めた平均的

な関係であるが、式(2)の関係を用いて得られた式(1)のスペクトルを用いて造波信号を作成し、造波した波の特性を調べてみると、有義波高が約5%、有義波周期が約10%小さくなる。この原因としては、式(2)の関係を用いたため、水理実験に用いる目標スペクトルとしては、合田⁵⁾は式(2)の代わりに次式を用いることを推奨している。

$$T_p = 1.14 T_{1/3} \quad (6)$$

以上示したように、有義波の諸元がある時間間隔に与えられるなら、式(6)の関係を用いて、式(1)あるいは(3)でスペクトルの形状を求めることができる。時刻 t_1 のときに有義波の諸元が (H_1, T_1) 、時刻 t_2 になると (H_2, T_2) になったと仮定する。この条件において、時刻 t_1 と t_2 の間の任意の時刻 t におけるスペクトルは以下のようにして求める。

時刻 t におけるピーク周波数 f_p は時刻 t_1 と t_2 間の内挿として次式で求める。

$$f_p = f_{p1} + \frac{f_{p2} - f_{p1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) \quad (7)$$

また、スペクトルのピーク値についても同様にして次式で与える。

$$S_p(t) = S_p(t_1) + \frac{S_p(t_2) - S_p(t_1)}{t_2 - t_1} (t - t_1) \quad (8)$$

ここに、 $S_p(t)$ は時刻におけるスペクトルのピーク値を示す。

周波数スペクトルとスペクトルのピーク値が求まると式(1)あるいは(2)でスペクトルの形状を決定することができる。例えば、スペクトルのピーク周期 f_p と値 $S_p(t)$ を用いて式(1)を書き直すと、次式のようになる。

$$S(f, t) = 3.49 S_p(t) (f / f_p)^{-5} \exp[-1.25(f / f_p)^{-4}] \quad (9)$$

ここに、 $S(f, t)$ は時刻 t における周波数スペクトルを示している。

(2) 成分波の設定

一方向不規則波の波形 $\eta(t)$ は、成分波の線形的な重ね合わせとして次式のように表すことができる。

$$\eta(t) = \sum_n a_n \sin(2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (10)$$

ここに、 a_n と f_n 、 ε_n は n 番目の成分波の振幅と周波数、位相のずれを示している。位相のずれは一般に $0 \sim 2\pi$ の間の乱数として与えられる。有義波の波高3m、周期7sの風波がうねり性の波に近づくと、波高4m、周期10sの波に変化したと仮定する。これをスペクトルの変化で示すと、図-1のように高周波数側のスペクトル値が低下し、低周波数側のスペクトル値が増大したことに対応している。この

ことは、ある周波数の成分波を考えると、振幅だけが時間的に変化したことに対応している。そこで、成分波の周波数を固定し、振幅を時間的に変化させることによって非定常な波浪を再現することにした。

ある暴風時の波浪から $f_{p\max}$ の間に成分波を取ったのでは、両端のス変化を考える。暴風時における最大と最小の有義波周期をそれぞれ T_{\max} と T_{\min} で与えると、暴風時の波浪はスペクトルのピーク周波数に直して $f_{p\min}(=1/1.14T_{\max})$ から $f_{p\max}(=1/1.14T_{\min})$ の間を変化することになる。 $f_{p\min}$ ペクトルを精度よく表すことができない。そこで、成分波の最小と最大の周波数を次式のように定めた。

$$f_{\min} = 0.1f_{p\min} \quad (11)$$

$$f_{\max} = 5f_{p\max} \quad (12)$$

最小周波数 f_{\min} としては0までとることができるが、非常に小さな周波数は造波効率が悪く、造波信号の中に長周期波を含むようになり、造波板の変位幅が大きくなる。最小周波数を0にした場合と式(10)で与えた場合に関して造波した波浪のスペクトルを比較したところ、図-2に示すように両者の差はほとんどなく、式(10)で最小周波数を設定してもよいことがわかった。最大の周波数 f_{\max} に関しては、式(11)で設定して造波しても有義波の諸元に大きな差がないことからこのように定めた。

最小と最大の周波数間における成分波の周波数については、乱数 γ_n を用いて次式で求めた。

$$f_n = \gamma_n(f_{\max} - f_{\min}) + f_{\min} \quad (13)$$

ここに、 f_n は小さい周波数から数えて n 番目の周波数で、乱数の表れる順位ではない。

式(9)における成分波の振幅 a_n はスペクトルとの関係から次式で求める。

$$a_n = \sqrt{2S(f_n, t)\Delta f_n} \quad (14)$$

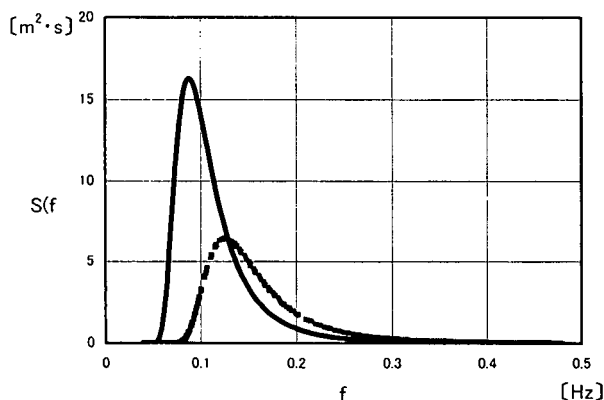


図-1 有義波の相違によるスペクトルの変化

ここに、 Δf_n は n 番目の成分波の周波数幅で、

$$\Delta f_n = (f_{n+1} - f_{n-1})/2 \quad (15)$$

で与えられる。

位相のずれを既に述べたように 0~1 の間の乱数で与えるなら、式(10)を計算することができる。一定のスペクトルになる不規則波を造波するには成分波の数 N として $N = 200$ あれば十分であるが、今回は、非定常不規則波の造波であるので、 $N = 500$ を標準とした。

(3) 非定常波浪の造波

造波板を前後に動かして造波する場合、造波板の動きを制御する信号を造波機に与えなくてはならないが、造波効率は造波形式および造波する成分波の周波数によって異なる。そのため、造波板の変位 $\xi(t)$ は次式のようになる。

$$\xi(t) = \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{F_n} \sin(2\pi f_n t + \epsilon_n) \quad (16)$$

ここに、 F_n は成分波 n の造波効率で、造波板が本実験で用いたピストン型の場合、次式で与えられる。

$$F_n = \frac{4 \sinh^2 k_n h}{2k_n h + \sinh 2k_n h} \quad (17)$$

ここに、 k_n と h は成分波 n の波数と水深である。 k_n と h 、 f_n の間には次式のような分散関係がある。

$$(2\pi f_n)^2 = gk_n \tanh k_n h \quad (18)$$

ここに、 g は重力加速度 ($9.8m/s^2$) である。

成分波のエネルギーの輸送速度は群速度と呼ばれ、周波数によって異なり、周波数の大きな波ほど群速度は小さい。そのため、各成分波を同時刻から造波し始めると、造波板からある距離はなれた地点には、周波数の小さい波が最初に到達し、次第に周波数の大きな波が到達するようになり、最後に周波数の一番大きな波が到達する。定常不規則波の場合

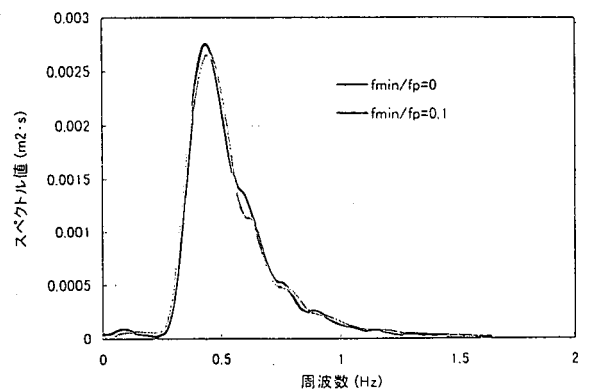


図-2 f_{\min} の値によるスペクトル形の相違

には、周波数が一番大きな波が到達してから計測を開始すればよい。しかしながら、非定常波浪の場合には、時々刻々成分波の振幅が変化するために、ある時刻の暴風時の状態を再現しようとする、周波数の大きな波を予め早く造波し、周波数の小さい波を後から造波して、目標とする地点にこれらの波が到達したときに、再現しようとしている暴風の開始状態になっていなければならない。

このようにするためには、次のように造波する必要がある。水深によって群速度は変化するために、水深変化を考慮した計算を行わなければならないが、簡単にするために、一様水深の水路を考える。そして、暴風時の波を再現する地点は造波板から X m の地点とする。最も周波数の高い波を造波し始める時間、つまり造波開始時間を $t=0$ とする。このようにすると、式 (16) の造波板の変位は次式のように修正される。

$$\xi(t) = \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{F_n} \sin[2\pi f_n(t - t_{0n})H(t - t_{0n}) + \varepsilon_n] \quad (19)$$

ここに、 $H(t - t_{0n})$ はステップ関数で

$$H(t - t_{0n}) = \begin{cases} 1: t - t_{0n} \geq 0 \\ 0: t - t_{0n} < 0 \end{cases} \quad (20)$$

で定義される。また、 t_{0n} は成分波 n の造波開始時間の遅れを示し、次式で与えられる。

$$t_{0n} = \frac{X}{C_{gn}} - \frac{X}{C_{gn}} \quad (21)$$

ここに、 C_{gn} は成分波 n の群速度で

$$C_{gn} = \frac{C_n}{2} \left(1 + \frac{2k_n h}{\sinh 2k_n h} \right) \quad (22)$$

であり、 C_n は波速で、次式で求まる。

$$C_n = \frac{g}{2\pi f_n} \tanh k_n h \quad (23)$$

以上のことから、式 (19) に示されているように造波板を駆動することができれば、非定常な波浪を造波することができる。

3. 実験による造波方法の検証

(1) 実験条件

2. において求めた、非定常波浪の造波方法を検証するために、水路内に非定常不規則波を造波して、目標としたような非定常波浪が造波されるかどうか検証実験を行った。

実験に用いた水路は図-3に示すように長さ 50m、幅 1m、深さ 1.5m で、ピストン型不規則波造波機が水路端に設置されている。水路床は造波板から 15m の地点から 1/20 の一様勾配床となっているが、本実験では水平床部分を用いた。実験では、造波板から 5 と 10、15m の地点に波高計を設置して、波形を測定したが、解析は造波板から 10m の地点における波形を対象に行った。水平床部での水深は 60cm とした。

実験に用いた波浪条件は、時間とともに一様に増大する場合と石川県の輪島沖で実際に観測された暴風時の非定常波浪の場合である。前者の場合、実験開始時に有義波の波高が 10cm、周期が 1.6s であった不規則波が 24 分後に波高が 20cm で、周期が 2.4s に発達する条件である。また、後者では 1/25 の模型縮尺を想定して、実測波浪を実験用に縮小した。観測値は 2 時間ごとに与えられており、有義波の変化の概略は以下の通りである。実験開始時、波高が 8.8cm (2.2m)、周期が 1.76s (8.8s) であった波が徐々に発達し、1 時間 12 分後 (6 時間後) に

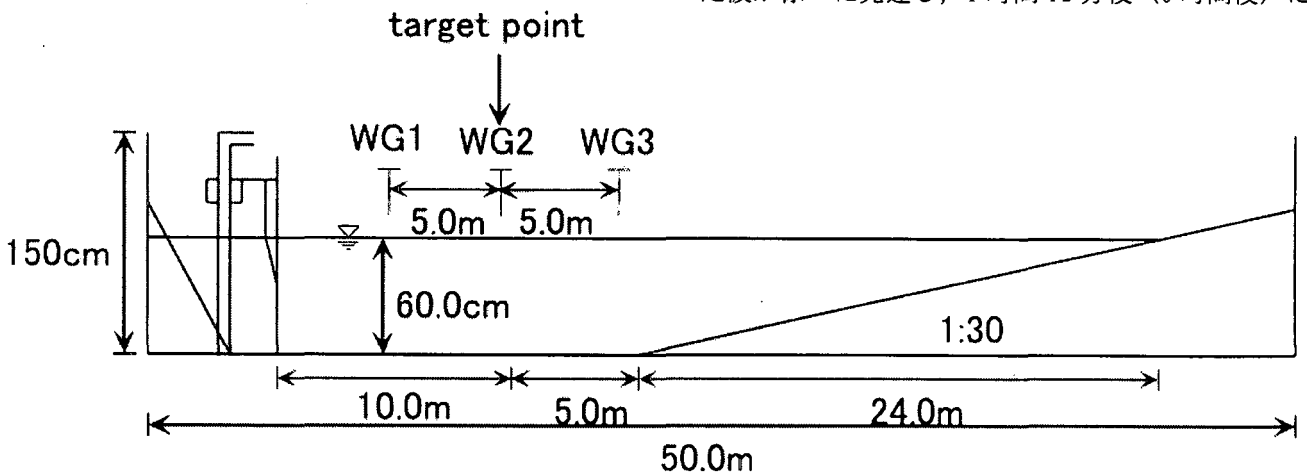


図-3 実験に用いた水路

最大の波浪になり、波高が 14.52cm (3.63m), 周期が 2.90s (14.5s) になった後は次第に減衰し、2 時間 48 分後 (14 時間後) には波高 9cm (2.25m), 周期 1.8s (9s) になった暴風浪である。() 内は現地における値である。

式 (19) で得られる造波信号を 40Hz 間隔に造波機に与えた。測定した波形も造波と同じく 40Hz 間隔にサンプリングして解析した。時間とともに一樣に波高が増大する場合は、6 分間のデータ、輪島沖の現地波浪では、目標時刻の前後 4 分間のデータをスペクトル解析等に用いた。また、有義波の諸元はゼロアップクロス法で求めた。

(2) 実験結果と造波方法の検証

波高が時間とともに増大する場合に関して目標値と実験値とを比較を行ったのが、図-4 である。図-4 の横軸は解析に用いた時刻を示している。また、縦軸の右の値は波高、左の値は周期を示している。図中の黒塗りの印が示す解析値とは、2. で示したように造波されて、対象地点に到達すると仮定して求めた理論的な値である。この解析値は、目標値とよく一致している必要がある。図でわかるように、解析値は有義波高でも周期でも目標値とよく一致しており、解析が正しく行われていることを示している。実験値と目標値との比較では、有義波高に関しては 0~6 分の区間で実験値が約 10% 解析値より小さくなっているが、この原因に関しては不明である。しかしながら、他の時刻では実験値は解析値とよく一致している。また、周期に関しては、12~18 分のときに実験値が約 10%、解析値より大きくなっているが、全体的に、実験値は解析値とよく一致しており、造波方式の妥当性を示していると考えられる。

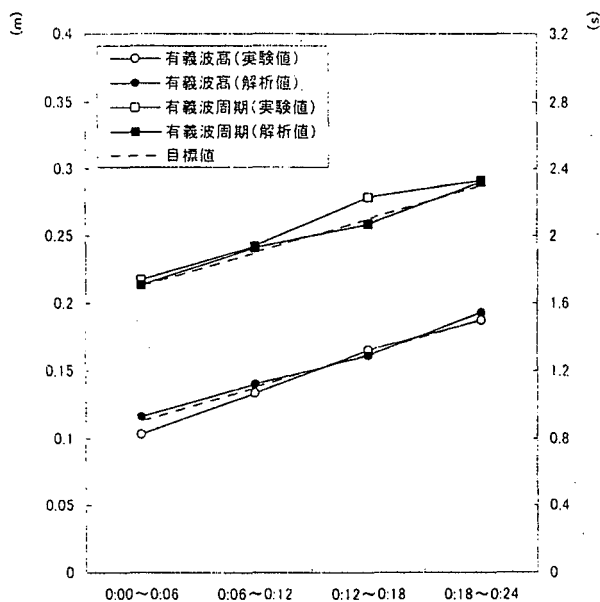


図-4 一樣な波高増大の条件における有義波の諸元に関する目標値と実験値の比較

えられる。

輪島沖の波浪観測値に関して行った実験では 2 時間 48 分造波し続けた。有義波の波高と周期に関して実験値と解析値、目標値を比較したのが図-5 である。図-5 からわかるように、有義波高に関しては解析値と目標値はよく一致しており、解析方法に問題はない。実験値は波高の高い時刻で解析値より 10% を少し超える程度大きくなっている。これは波浪の非線形性の影響が現れたためかもわからない。有義波の周期については、実験値は解析値より目標値に近い傾向がある。しかしながら、これらの差は小さくなく、全体的によく一致していると考えられる。このことから非定常波浪の造波方式は、十分な精度で活用できることが明らかになった。

図-6 は各時刻におけるスペクトル形について目標値と実験値を比較したものである。実験値は実線、目標値は点線で示している。1 時間 12 分や 1 時間 36 分のように波高が大きな時刻では、スペクトルのピーク周波数の 2 倍周波数のところにも非線形性によるピークが現れている。しかしながら、目標値は標準型のスペクトルを用いているためにこのようなピークは現れない。このような差はあるものの、実験値のスペクトルは目標値のものによく一致し、非定常造波方法の妥当性を検証していると考えられる。

4. あとがき

本研究では、暴風時の波浪のような非定常な波浪を実験水路内に造波する手法を提案した。そして、時間的に比例して波浪が増大する場合や輪島沖で観測された実際の暴風時の非定常波浪を実験水路内に再現し、目標値と比較した。その結果、目標値と実験値は有義波高の諸元でも、また、スペクトル形においてもよく一致し、非定常波浪の造波方法の妥当性を確認することができた。

今後は、この手法をさらに使い易いシステムに改

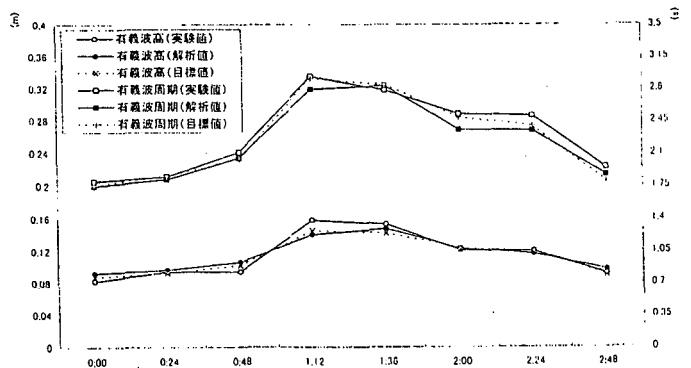


図-5 輪島沖観測波浪の有義波の諸元に関する目標値と実験値の比較

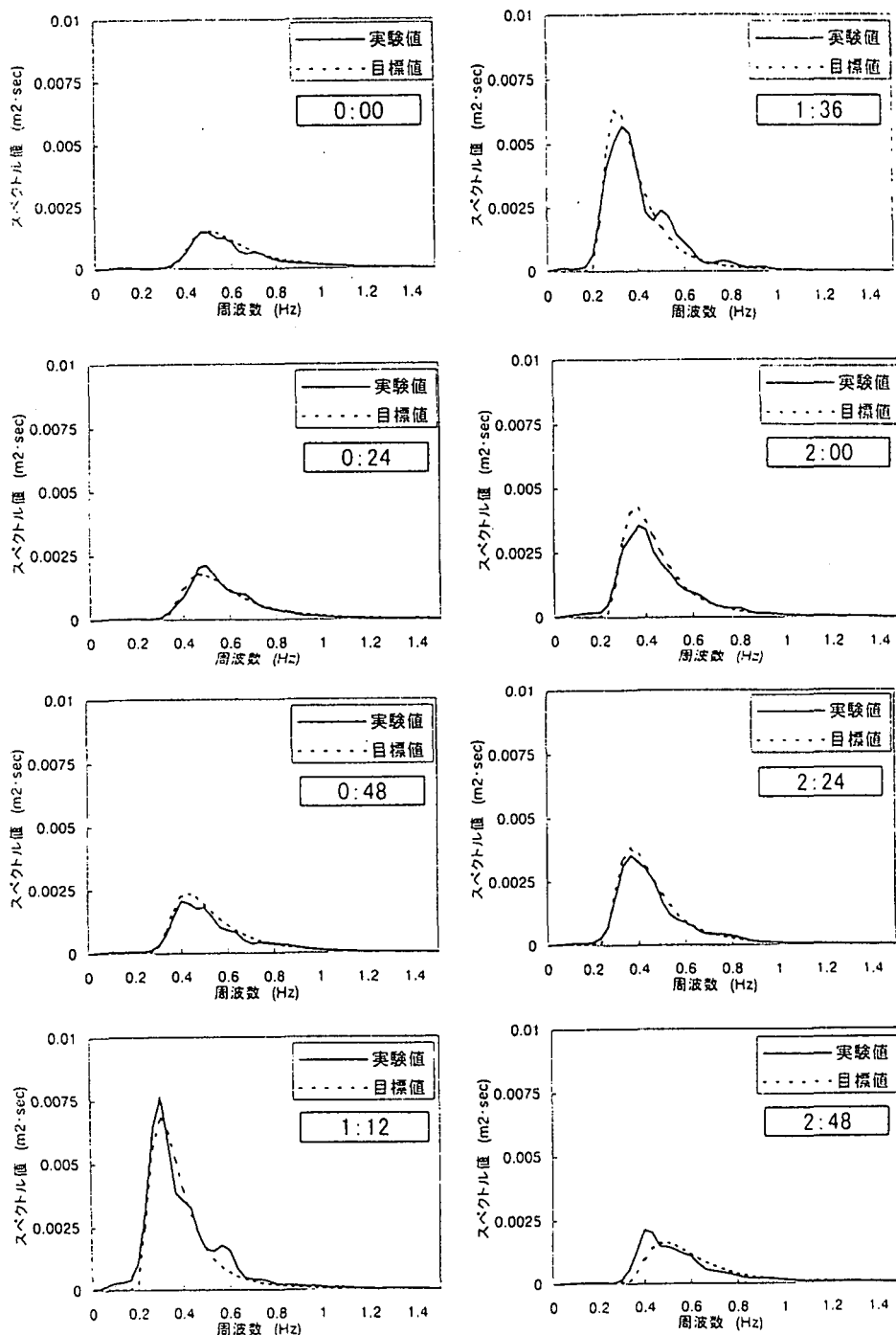


図 - 6 輪島沖の波浪スペクトルに関する実験値と目標値の比較

良すると同時に、非正常な多方向不規則波の造波に応用することを考えている。

最後に、本実験を遂行するに当たり、造波機の使用方法や計測方法を教示して頂いた、京都大学防災研究所 藤木繁男技官に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 帯包浩司・高山知司・間瀬 肇・永井紀彦：異常波浪の変化特性に関する研究，'99 日本沿岸域学会研究討論会講演概要集，No. 12，pp. 92-95，1999。
- 2) 高橋重雄他：台風 9918 号による護岸の被災とその対策に関する模型実験，港湾技研資料，No. 973，50p.，2000。
- 3) 平山克也・平石哲也・細谷徳男：時間的に変化する波浪の造波とその解析，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 6-10，2000。
- 4) 合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp. 156-169，1990。
- 5) 合田良実：数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質，第 34 回海岸工学講演会論文集，pp. 131-135，1987。