

無反射式多方向造波装置の開発と性能評価

長山 智則*・佐藤 慎司**・磯部 雅彦***・都築臨太郎****

多方向不規則波浪場を対象とする水理実験を実施するためには、反射波を吸収しながら造波するシステムを実現する必要がある。しかし、安定性の確保や吸収性能評価が困難であることから平面水槽でこれを実現した例は少ない。本研究では、無反射式多方向造波システムと吸収性能評価手法を開発した。まず、水位変動を造波機の位置制御にフィードバックするシステムを微小振幅波の仮定を用いて開発し連続板式多方向造波装置に実装した。次にこの装置で実現された波浪場を、波向きを含めて成分波に分離して吸収性能評価をした。その結果実装したシステムは実用範囲で十分に小さい再反射率をもち、多方向不規則波を安定して造波できることが確認された。

1. はじめに

海岸での実現現象や海岸構造物の水理特性を解明するために、平面水槽での模型実験が数多く行われている。その結果は多くの分野で活用されており、模型実験の果たす役割は大きい。しかしながら平面水槽での模型実験における問題として造波板における再反射が挙げられる。模型などで反射した波は造波板で再反射し波浪場を乱してしまう。場合によっては水槽内で共振が生じ、所望の実験条件から大きく外れることになる。この問題に対し、波の多方向性を無視しうる 2 次元水路では川口 (1986) により造波機前面の水位データを用いた吸収造波制御法が提案され実用に供されている。一方、波の多方向性が問題となる平面水槽では、川口の方法を拡張する試みがなされてきたが、供用に耐える方法はまだ提案されていない。問題として、吸収造波可能な波向き、周波数帯域が限られることや、不安定現象、吸収性能を実験により評価する方法が確立されていないことが挙げられる。

そこで本研究では、無反射式多方向造波装置を開発し、その吸収性能を、新たに開発した吸収性能評価法を用いて確かめる。

2. 実験装置

実験に用いた平面水槽を図-1 に示す。造波機は計 71 台で造波機番号 1 から 71 まで順に並んでいる。設置間隔は 15 cm、制御時間間隔は 0.01 s 以上 0.005 s 刻みで設定可能、ストローク限界 ± 90 mm、速度限界 0.3 m/s、造波機位置での水深は 23 cm である。各造波機の前には波高計が設置されて水位が造波機制御にフィードバックされる。3 台のターミナルコンピュータがそれぞれ 24, 30, 17 台の造波機を独立して制御する。

3. 吸収造波制御

座標系、変数を図-2 に示す。静水面上に造波機列に沿って y 軸を、これと垂直に x 軸を、静水面から鉛直上向きに z 軸をとる。ピストン型造波板を想定して造波機列変位は鉛直方向に一定で $X(y, t)$ とする。 h は水深、 θ は波向きである。水位変動のうち、入射波によるものを η_c 、反射波によるものを η_r 、造波板での再反射波によるものを η_{rr} とする。 η_{cp} は η_c の進行波成分を表す。

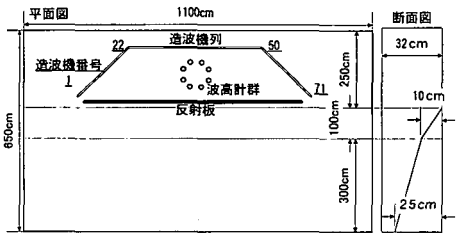


図-1 平面水槽

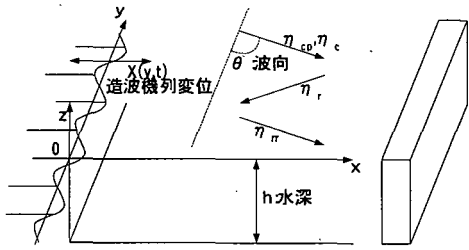


図-2 座標系と変数の定義

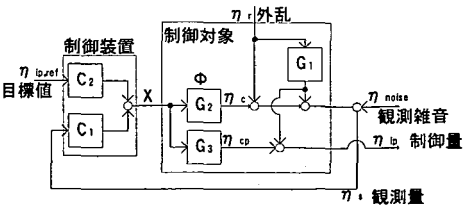


図-3 ブロック線図

* 学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
** 正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
*** フェロー 工博 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境工学専攻
**** 工修 (前) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

3.1 理 論

信号の流れをブロック線図、図-3 に示す。造波板から離れる向きに進む進行波を η_p 、その目標値を $\eta_{p,ref}$ 、観測雑音を η_{noise} 、計測水位を η_s とした。 G_1 , G_2 , G_3 は制御対象の物理的関係を表す伝達関数でそれぞれ再反射率、造波、進行波の造波を意味する。 C_1 , C_2 は制御装置の伝達関数である。

まず制御対象をモデル化し、その伝達関数を求める。微小振幅波理論を適用すると制御対象は速度ポテンシャル $\Phi(x, y, z, t)$ に関する境界値問題で表される。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} + \eta = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5)$$

これらを解くと造波板変位と速度ポテンシャルは伝達関数 $B(x, z)$ を介して式 (6) の関係にあることが分かる。

$$\Phi(x, y, z, t) = B(x, z)X(y, t) \quad (6)$$

$$B(x, z) = -\frac{\omega}{A_0} \frac{\exp(i(\sqrt{k_0^2 - k_y^2}x)) \cosh k_0(z+h)}{\sqrt{k_0^2 - k_y^2} \cosh k_0 h} - i\omega \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\sqrt{k_n^2 + k_y^2}x) \cos k_n(z+h)}{A_n \sqrt{k_n^2 + k_y^2} \cos k_n h} \quad (7)$$

$$A_0 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_0 h}{\sinh 2k_0 h} \right) \quad (8)$$

$$A_n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_n h}{\sin 2k_n h} \right) \quad (9)$$

k_0 , k_n は分散関係式から定められる波数、 k_y は y 方向の波数で、これらは全て実数である。式 (2) と式 (6) より造波の伝達関数 G_2 は次のように表される。

$$G_2(k_y, \omega) = k_0 \tanh k_0 h \left(i \frac{1}{A_0 \sqrt{k_0^2 - k_y^2}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{A_n \sqrt{k_n^2 + k_y^2}} \right) \quad (10)$$

G_3 は式 (10) の虚部である。 G_1 は完全反射を仮定する。

$$G_1(k_y, \omega) = 1 \quad (11)$$

次に、制御装置を設計する際の目標値と制約を求める。目標は $\eta_{p,ref}$ から η_p への閉ループ伝達関数 G_{c1} と、 η_r から η_p への閉ループ伝達関数 G_{c2} についての次式である。各伝達関数は図-3 の関係より求められる。

$$G_{c1} = \frac{C_2 G_3}{1 - C_1 G_2} = 1 \quad (12)$$

$$G_{c2} = \frac{C_1(G_3 + G_1 G_3 - G_1 G_2) + G_1}{1 - C_1 G_2} = 0 \quad (13)$$

C_1 , C_2 について解くと目標値 $C_{1,aim}$, $C_{2,aim}$ が得られる。

$$C_{1,aim} = -\frac{G_1}{G_3 + G_1 G_3 - G_1 G_2} \quad (14)$$

$$C_{2,aim} = \frac{1}{G_3} - C_1 \frac{G_2}{G_3} \quad (15)$$

C_2 はあらかじめ η_{pref} に作用させた上で時系列を記憶することができるので実時間での処理を必要としない。よって今後 C_1 についてのみ述べる。

制御装置の制約は安定性を満たすことである。具体的には① C_1 が不安定極を持たないこと、② 閉ループの安定条件を満たすこと、③ η_{noise} から η_p への閉ループ伝達関数 G_{c3} が小さいことである。②は閉ループ伝達関数 $-C_1 G_2$ が式 (16) の不安定条件を避けることであり、③の G_{c3} は式 (17) で表される。

$$\angle(-C_1 G_2) = -\pi, | -C_1 G_2 | > 1 \quad (16)$$

$$G_{c3} = \frac{C_1 G_3}{1 - C_1 G_2} \quad (17)$$

3.2 数値フィルタによる実現

数値フィルタを用いて制御装置を実現する。まず簡単のため、減衰定常波成分を無視する。直方向の波向を仮定して k_y を 0 とすると目標値は次式のように表される。

$$C_{1,aim} = i \frac{A_0}{\tanh k_0 h} \quad (18)$$

式 (19) で表されるアナログフィルタで式 (18) を近似する。 a , d は設計すべきパラメータである。

$$C_1(s) = \frac{1}{d + as} \quad (19)$$

双一次変換を施すとデジタルフィルタ $H_n(z_1)$ が得られる。 Δt は制御時間間隔を表す。

$$C_1(z_1) = \frac{c_0 + c_1 z_1^{-1}}{1 - d_1 z_1^{-1}} \quad (20)$$

$$c_0 = c_1 = \frac{1}{\frac{2a}{\Delta t} + d} \quad (21)$$

$$d_1 = \frac{\frac{2a}{\Delta t} - d}{\frac{2a}{\Delta t} + d} \quad (22)$$

$$z_1 = \exp(i\omega \Delta t) \quad (23)$$

波向き依存性を考慮するためにパラメータ α , β を導入する。 α , β の物理的意味はそれぞれ制御点の水位、1 ステップ前の変位に対する、隣接制御点の重みである。

$$C_1(z_2, z_1) = \frac{c_0 + c_1 z_1^{-1}}{1 - d_1 z_1^{-1} \left((1 - \beta) + \frac{\beta}{2} (z_2^{-1} + z_2) \right) \left((1 - \alpha) + \frac{\alpha}{2} (z_2^{-1} + z_2) \right)} \quad (24)$$

$$z_2 = \exp(ik_y \Delta y) \quad (25)$$

Δy は造波機間隔を表す。式 (24) を時間領域に変換すると

$$X_j^n = c_0 w_j^n + c_1 w_j^{n-1} + d_1 \left((1 - \beta) X_j^{n-1} + \frac{\beta}{2} (X_{j+1}^{n-1} + X_{j-1}^{n-1}) \right)$$

$$w_j^n = (1 - \alpha) \eta_{s,j}^n + \frac{\alpha}{2} (\eta_{s,j+1}^n + \eta_{s,j-1}^n) \quad (26)$$

右上, 右下の添え字はそれぞれ空間, 時間の離散座標を示す。以上, 計測水位を入力, 造波板変位を出力とする数値フィルタが得られた。

目標値を近似するためパラメータを設定した。

$$d = -0.1 \quad (27)$$

$$\alpha = -\frac{1}{2\pi} \quad (28)$$

$$\alpha = 0.5 \quad (29)$$

$$\beta = 0 \quad (30)$$

このとき①～③の安定性は満たされている。理論吸収性能として再反射率 $|G_{c2}|$ を図-4 に示す。周波数, 波向が大きい領域で再反射率が大きくなっているがこれは空間的なナイキスト振動数よりも y 方向波数が大きい領域である。 α, β の導入と, 0.15 m という小さな制御間隔により, 2 Hz 程度までは小さな入射角に対しても再反射率を小さく抑えることができた。

次に, 減衰定常波を考慮して吸収性能の向上を図る。 G_2 の実部は 1 Hz までは虚部に比べて無視できる程小さいが, 急激に増加し 4 Hz では実部が虚部より大きくなる。 $C_{1,aim}$ は

$$C_{1,aim} = \frac{-1}{2G_3 - G_2} = \frac{-1}{k_0 \tanh k_0 h \left(i \frac{1}{A_0 \sqrt{k_0^2 - k_y^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{A_n \sqrt{k_n^2 + k_y^2}} \right)} \quad (31)$$

式 (24) で表される数値フィルタのパラメータ c_0, c_1, d_1 を次の誤差関数 $\text{Error}(c_0, c_1, d_1)$ を最小にするようにシンプレックス法により決定した。

$$\text{Error}(c_0, c_1, d) = \sum_f G_{c2}(f_i) \quad (32)$$

最適化に用いる周波数は {0.2, 2, 4} Hz とした。得られたフィルタは次のとおりである。

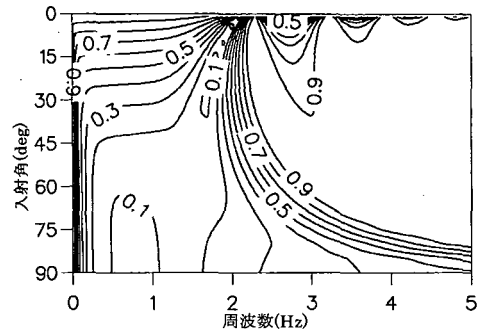


図-4 再反射率 (減衰定常波無視)

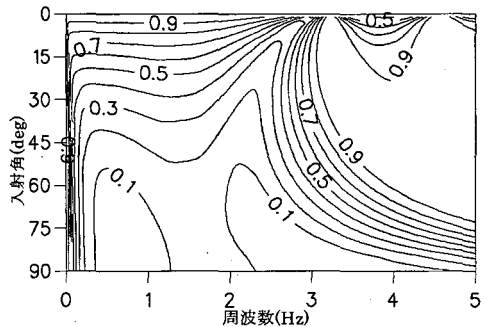


図-5 再反射率 (減衰定常波考慮)

$$c_0 = 0.19299 \quad (33)$$

$$c_1 = -0.25456 \quad (34)$$

$$d_1 = 0.99402 \quad (35)$$

このとき①～③の安定性は満たされている。理論吸収性能として再反射率 $|G_{c2}|$ を図-5 に示す。図-4 に比べ再反射率を抑えられていることが分かる。

4. 現性能評価

4.1 安定性

減衰定常波考慮の有無それぞれの数値フィルタをターミナルコンピュータに実装し安定性を調べたところ自励振動が観察された。減衰定常波を考慮しない場合に造波機前面波高計でとらえた自励振動の様子を図-6 に示す。群波を造波した後の水位変化であり, 8 秒前後に群波が通過し約 16 秒から 4 Hz 程度の自励振動が生じている。減衰定常波を考慮した場合にはより低周波数側で生じた。自励振動の原因は次に挙げる理由からノイズの増幅でなく制御法固有の不安定現象であると考えられる。

a) Δt の増加とともに自励振動の周波数が低下する。 Δt が 0.1 s の場合, 自励振動の周波数はおよそ 2 Hz である。

b) ノイズレベルが高い波高計と自励振動の生じる造波

機が対応しない。

c) 制御の途中から始まる。(図-6)

d) 減衰定常波を考慮した場合、自励振動と共に、ノイズの増幅と考えられる高周波微振動が生じる。

d) の高周波微振動は、その生じやすい造波機とノイズレベルの高い波高計と対応していることおよび制御中は必ず生じていることからノイズの増幅によると考えられる。減衰定常波を無視した場合には高周波領域でゲインが小さいため微振動が抑制されている。

自励振動について考察したところ外乱が加わった場合に実現すべき制御装置伝達関数 $C_{i,aim}$ と、外乱を考慮しない場合の伝達関数 $C_{i,aim}$ とでは実部の符号が逆になることがわかった。これらの伝達関数実部は物理的には減衰定常波に相当する。よって減衰定常波の影響が顕著になる高周波数領域では $C_{i,aim}$ を目標に数値フィルタを設計すると $C_{i,aim}$ との位相差が大きく外乱に対する安定性が低下し自励振動が生じると考えられる。高周波数領域では吸収性能と安定性を両立できない。

高周波数領域では位相がずれると吸収性能と安定性のどちらかが損なわれるので位相を約 90° に保ったままゲインをさらに小さくし自励振動を抑えることとした。ただし、ゲインを急激に低下させると低周波数側でも位相が変化し安定性または吸収性能を損なうので一般的なローパスフィルタは使えない。式(19)の位相はパラメータ a に対する感度が小さいのでこれを変化させ、ゲイン低下を図った。2.5 Hz の規則波を造波しながら吸収制御を行った場合の造波機前面波高計測値のパワースペクトルを図-7 に示す。 a を大きくするとゲインが低下し、4 Hz 弱の自励振動が抑制されることが分かる。そこで吸収性能は低下するが振動現象を抑制するためパラメータを再設定した。

$$a = -\frac{1.5}{2\pi} \dots\dots\dots (36)$$

4.2 吸 収 性 能

図-1 のように平面水槽内に反射板を設置し造波板と反射板で囲まれた領域に図-8 に示す群波を入射する。水位を計測し、反射波、再反射波の振幅を比べることで造波板における再反射率を決める。しかし、この領域では各造波板、反射板で反射した成分が干渉するので計測水位から直接反射波、再反射波を決定することは困難である。そこで波向別に水位変動を分離し、反射波、再反射波を検出することにした。成分波分離にあたっては2次元での入反射波分離法(香取ら, 1992; 北野ら, 2001)を拡張し多方向波を扱う。波形追跡法および解析信号を利用した方法で分離に成功したがここでは後者について述べる。

波高計 k の計測水位 $\{\eta_k(t)\}$ およびその Hilbert 変換

$\{\tilde{\eta}_k(t)\}$ から式 (37) のように解析信号 $\{\xi_k(t)\}$ を得る。

$$\{\xi_k(t)\} = \{\eta_k(t)\} + i\{\tilde{\eta}_k(t)\} \dots\dots\dots (37)$$

第 l 番目の波向成分の解析信号を $\xi_{cl}(t)$ とすると、 $\{\xi_k(t)\}$ は成分波と誤差で次式のように表される。

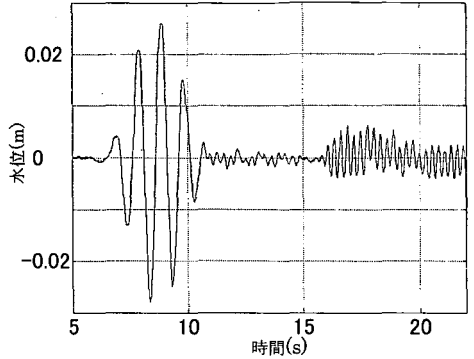


図-6 自励振動

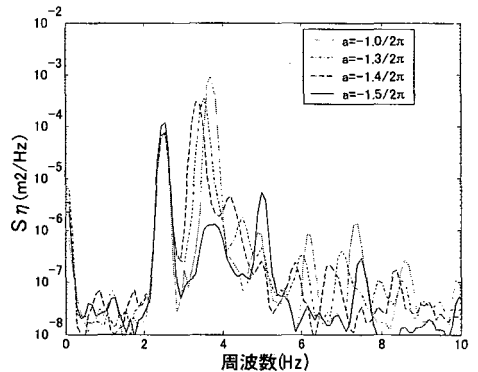


図-7 水位パワースペクトル

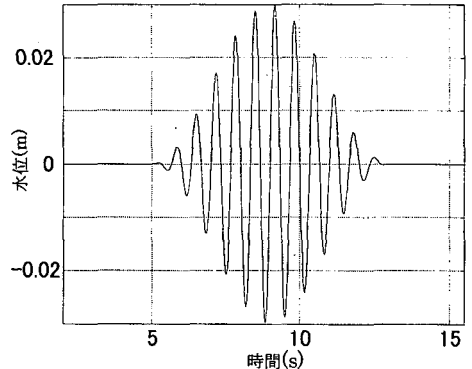


図-8 造波波形

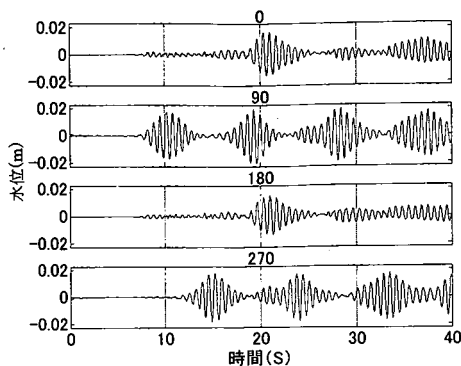


図-9 波向別成分波分離結果

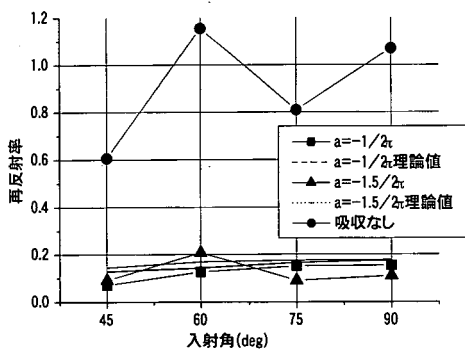


図-10 波向別成分波分離結果

求めた。図-10に周波数 1.5 Hz の場合の再反射率とその理論値を示す。0.8 Hz, 1.5 Hz でも同様に再反射率が 0.2 以下になっていることが確認できた。2.0 Hz では再反射率 0.4 程度になるものの、実験に用いる周波数帯域では十分な吸収性能を有しているといえる。なお、図-10において 45° で再反射率が低く、60° で高くなっているが、隅角部から発したエネルギーの大きな波が入射角 45° の場合には反射波として、60° の場合には再反射波として計測地点に達していることに起因する。

5. 結 論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

(1) 水位変動を造波機的位置制御にフィードバックする無反射式多方向造波システムを開発し造波装置に実装した。

(2) 無反射式多方向造波装置の吸収性能を実験により評価する方法を開発した。波形追跡法と解析信号を利用した方法で、平面水槽内の波浪場を波向別の成分に分離し、検出された反射波、再反射波の振幅比から再反射率を求めて吸収性能を評価した。

(3) 開発した無反射式多方向造波装置に自励振動という不安定現象が生じることがわかったため、ゲインを低下させることで安定性を確保した。ゲイン低下により吸収性能は低下するが、新たに開発した吸収性能評価法を適用したところ十分な吸収性能が確認された。

自励振動を抑制するため高周波数帯域で安定性を重視し、吸収性能を犠牲にした。この方法は、実験に使用する周波数帯域で減衰定常波が大きくなる場合には適用できない。たとえば、水深の大きい水槽では、実験に使用する低周波数帯域でも減衰定常波が生じる。このような場合に安定性と吸収性能を両立させるには、自励振動を抑制する新たな制御手法が必要とされる。

参 考 文 献

- 香取完和・平良達也・水口 優 (1992): 波形追跡法による入射波の分離, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 16-20.
- 川口 隆 (1986): 波面検出および速度制御を用いた無反射造波方式, 三井造船技報, 第 128 号, pp. 20-24.
- 北野利一・山本陽平・喜岡 渉・間瀬 肇 (2001): 時間領域における入射波分離法の試み, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 166-170.

$$\begin{Bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \vdots \\ \xi_n(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{21} & \cdots & \varphi_{m1} \\ \varphi_{12} & \varphi_{22} & \cdots & \varphi_{m2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{1n} & \varphi_{2n} & \cdots & \varphi_{mn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_{c,1}(t) \\ \xi_{c,2}(t) \\ \vdots \\ \xi_{c,m}(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_1(t) \\ \varepsilon_2(t) \\ \vdots \\ \varepsilon_m(t) \end{Bmatrix} \quad (38)$$

最小自乗法により成分波の解析信号は次のように求められる。

$$\{\xi_{c,i}\} = [\varphi_{ki}]^T [\varphi_{ki}]^{-1} [\varphi_{ki}]^T \{\xi_k\} \quad \cdots \cdots \cdots (39)$$

$\xi_{c,i}(t)$ の実部から成分波 $\eta_{c,i}(t)$ が、絶対値から再反射率の決定に必要な振幅が得られる。波向別成分波分離の例として、図-9 に吸収制御を行わずに入射角 90° で群波を造波した場合を示す。各成分波の上に対応する波向きを示す。吸収制御の有無それぞれのケースで、群波成分波の周波数 0.8 Hz, 1.0 Hz, 1.5 Hz, 2.0 Hz で再反射率を