

グリーン関数を用いた可撓性シートの波浪制御特性とエネルギー損失に関する研究 - 2次元の場合 -
 Relation between Wave Control and Energy Loss for a Flexible Sheet - two-dimensional type -

戸松 真介* 佐藤 幸雄** 浜中 建一郎***

Shinsuke Tomatsu, Yukio Sato, Ken-ichiro Hamanaka

In this paper, the submerged structure for wave control using a flexible sheet with some springs was proposed. To investigate the characteristics of this structure, the ratio of reflected and transmitted waves was calculated in two-dimensional case, using the boundary element method with three cases of 1, 3, and 5 sheets. When the oscillation of sheet was caused by water waves, the phase difference between water waves and motion of sheet occurred according to wave period. Considering this phase difference in numerical analysis, it was found that analyzed result agreed with experimental results.

Key word; wave control, B.E.M, flexible sheet

1. まえがき

船舶の航行、海洋上の景観などを考慮した没水型の波浪制御構造物として、没水平板あるいは可撓性シート等の波浪制御構造物が提案されている。特に可撓性シートについては加藤ら(1993)により、ある程度の制御効果が得られることが示されている。その後、先川ら(1996)は可撓性シートの波浪制御効果に対する数値解析として、グリーン関数を用いた2次元波動場解析を行っているが、この場合解析結果と実験結果を反射率および透過率によって比較したとき、未だ、若干のズレが生じ、解析方法はシートによる波浪制御特性を十分に表現していないと考えられる。そこで本研究では、シート周辺におけるエネルギー損失量のモデル化に加えて、シートの振動と波動との間に生じる位相のズレを考慮した数値解析を行なうことを試みた。その結果はより実験値に一致し、解析方法の妥当性が確認された。以下にその詳細を述べることとする。

2. 理論解析

(1) 基礎方程式と Green の積分方程式

有次元の速度ポテンシャルとして時間的に周期的な関数 Φ を以下のように仮定して、

$$\Phi = \text{Re} \left\{ \hat{\phi} e^{-i\hat{\omega}\hat{t}} \right\} \quad (\hat{\omega}: \text{角周波数}, \hat{t}: \text{時間}, \wedge: \text{有次元量})$$

角周波数 $\hat{\omega}$ と重力加速度 $\hat{g}$ で無次元化すると。

$$\Phi = \text{Re} \left\{ \phi e^{-it} \right\}$$

基礎方程式と水面、水底での境界条件は

$$\Delta\phi = 0, \quad \partial\phi/\partial z = \phi \quad (\text{on } z = 0), \quad \partial\phi/\partial z = 0 \quad (\text{on } z = -h)$$

没水深 d に設置された幅 B のシートを考えて、シートの変位を ξ とし、以下のように仮定する。

$$\xi = \alpha \cos \beta x e^{-it}, \quad \beta = \pi/B$$

考える領域内で任意位置 P 点のポテンシャルは断面2次元の Green 関数 G を用いると

$$-\phi(P) = \int_S (\phi \partial G / \partial \nu - G \partial \phi / \partial \nu) ds \quad (1)$$

ここで Green 関数 G は、

$$G = C_0 e^{ik|x-x_0|} \cosh k(z_0+h) \cosh k(z+h) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-k_n|x-x_0|} \cos k_n(z_0+h) \cos k_n(z+h)$$

$$C_0 = i/k(h + \sinh^2 kh), \quad C_n = 1/k_n(h - \sin^2 k_n h) \quad (2)$$

この Green 関数は水面と底面の境界条件を満たすから①式の積分範囲 S はシート上下面と両側の遠方境界のみとなり、 $S = S_1 + S_2 + S_f$ である。遠方境界では放射条件を満たすからそこでの積分は P 点での入射波ポテンシャル $\phi_i(P)$ となり、従って、

$$-\phi(P) = \int_{S_1+S_2} (\phi \partial G / \partial \nu - G \partial \phi / \partial \nu) ds - \phi_i(P) \quad (3)$$

* 学生会員 北見工業大学大学院土木開発工学科 (現在、北日本港湾コンサルタント(株))

** 正会員 北見工業大学工学部土木開発工学科 (〒090 北見市公園町 165 番地)

*** 正会員 北海道東海大学工学部海洋開発工学科

次にシートの上下面では以下のことが成り立つ。

$$\partial G/\partial v = -\partial G/\partial v_2, \quad \partial \phi_1/\partial v_1 = -\partial \phi_2/\partial v_2$$

$$G|_{S_1} = G|_{S_2} \quad \text{これにより、③式は}$$

$$-\phi(P) = \int_{S_2} (\phi_2 - \phi_1) \partial G/\partial v_2 dS - \phi_1(P) \quad (4)$$

④式より、問題はシートの上下面でのポテンシャルの差を求めることに帰着する。

(2) 圧力方程式とシートの張力

$$\text{任意点での圧力は} \quad p = -z - \partial \Phi/\partial t \quad (5)$$

シートの上下面での圧力差は、⑤式より

$$\begin{aligned} \Delta P &= p_1 - p_2 \\ &= -\partial \Phi_1/\partial t + \partial \Phi_2/\partial t = i(\phi_1 - \phi_2)e^{-it} \end{aligned} \quad (6)$$

次にシートの張力 T による鉛直張力 F_z は以下となる。

$$F_z = T \partial^2 \xi / \partial x^2 = -T \alpha \beta^2 \cos \beta x e^{-it} \quad (7)$$

$$\text{⑥式と⑦式より} \quad \phi_1 - \phi_2 = iT \alpha \beta^2 \cos \beta x \quad (8)$$

以上より、 α を決定すれば、④式より任意の位置 P でのポテンシャル $\phi(P)$ が求まる。

(3) シートの振動振幅

次に α を求めることを考える。 P 点の座標を (x_0, z_0) として、④式の両辺を z_0 で微分する。

$$\partial \phi(P)/\partial z_0 = \int_{S_2} (\phi_1 - \phi_2) \partial^2 G/\partial v_2 \partial z_0 dS + \partial \phi_1(P)/\partial z_0 \quad (9)$$

次に、 P 点をシートの中央点 Q に位置させると、流速は、

$$\begin{aligned} \partial \Phi(P)/\partial z_0 &= \partial \phi(P)/\partial z_0 \cdot e^{-it} \\ &= \partial \xi / \partial t = -i \alpha e^{-it} \end{aligned} \quad (10)$$

⑧、⑩式を⑨式に代入し、 $\partial/\partial v_2 = \partial/\partial z$ を考慮すると

$$\begin{aligned} &-i \alpha \\ &= iT \alpha \beta^2 \int_{S_2} \cos \beta x \partial^2 G/\partial z \partial z_0 dS + \partial \phi(P)/\partial z_0 \end{aligned} \quad (11)$$

⑪式で未知数は α だけだから、右辺の積分が実行できれば解は定まることになる。

(4) シート上の積分

Green 関数の特異性を考慮して特異点近傍の主値積分とそれ以外の積分に分けて、結果としてこの部分

を I と置く。特異点近傍での主値積分は

$$I_1 = \int_{-\Delta b}^{\Delta b} \partial^2 G/\partial z \partial z_0 dx = -1/\pi (1/\Delta b) \quad (12)$$

特異点近傍以外の積分では通常の積分で考えるので、求めるべき未知数 α は

$$\alpha = i \left\{ \partial \phi_1(P)/\partial z_0 \right\} / (1 + T \beta^2 I) \quad (13)$$

シートが複数枚ある時はそれぞれのシートの振幅を未知数にして連立させて解けばよい。

(5) 水面でのポテンシャル

$$J = \int_{-B/2}^{B/2} \cos \beta x e^{ik(x-x_0)} dx$$

$$J_n = \int_{-B/2}^{B/2} \cos \beta x e^{k_n(x-x_0)} dx$$

とすると、水面でのポテンシャルは

$x_0 \leq -B/2, x_0 \geq B/2$ の時それぞれ、 J, J_n, J', J'_n を用いて

$$\phi(P) = iT \alpha \beta^2 J k C_0 \cosh k(z_0 + h) \sinh k(z + h) \quad (14)$$

$$-iT \alpha \beta^2 \sum_n J_n k_n C_n \cos k_n(z_0 + h) \sin k_n(z + h) + \phi_1(P)$$

$$\phi(P) = iT \alpha \beta^2 J' k C_0 \cosh k(z_0 + h) \sinh k(z + h)$$

$$-iT \alpha \beta^2 \sum_n J'_n k_n C_n \cos k_n(z_0 + h) \sin k_n(z + h) + \phi_1(P) \quad (15)$$

減衰定在波の項を省略すると、反射波のポテンシャルは

$$\phi(P) = iT \alpha \beta^2 J k C_0 \cosh k(z_0 + h) \sinh k(z + h) \quad (16)$$

通過波のポテンシャルは

$$\phi(P) = iT \alpha \beta^2 k C_0 J' \cosh k(z_0 + h) \sinh k(z + h) + \phi_1(P) \quad (17)$$

により求められる。

(6) Energy Loss のモデル化

次に、シート周辺に発生する渦および乱れによるエネルギー損失量を直接見積もる事は難しいため、シート近傍のポテンシャル流の流速に式⑩より $\pi/2$ ズれた成分を考えて、

$$v' = \gamma \cos \beta x e^{-i(t-\pi/2)} \quad (18)$$

とすると、仕事量 W は、式⑧を用いて、

$$\begin{aligned} W &= -v'(P_1 - P_2) \\ &= \gamma T \alpha \beta^2 \cos^2 \beta x (e^{-2it} - 2 + e^{2it}) \end{aligned}$$

さらに、仕事量 W の 1 周期間の平均仕事量 $\bar{W}$ は

$$\bar{W} = 2\gamma T \alpha \beta^2 \cos^2 \beta x$$

となり、この $\bar{W}$ が境界層内で発生するエネルギー損失量となると仮定した。

エネルギー損失係数 C を用いて、

$$\gamma = \alpha \beta^2 T C \quad (19)$$

と置くと、式⑬の α は

$$\alpha = i \{ \partial \phi_i(P) / \partial z_0 \} / \{ 1 + T \beta^2 (I + iC) \} \quad (20)$$

となる。

(7) シートと波の位相差を考慮した場合

シートの振動が波の振動より δ_T 位相がズレているとする。また、シートの鉛直変位速度に比例する抵抗を $-\lambda \partial \xi / \partial t$ (λ ; 抵抗係数) が作用すると仮定すると、

$$\xi = \alpha \cos \beta x e^{-i(t-\delta_T)}$$

$$F_z = T \partial^2 \xi / \partial x^2 - \lambda \partial \xi / \partial t$$

$$= -T \alpha \beta^2 \cos \beta x e^{-i(t-\delta_T)} + i \lambda \alpha \cos \beta x e^{-i(t-\delta_T)}$$

したがって式⑬は、

$$\phi_1 - \phi_2 = -\alpha \cos \beta x e^{i\delta_T} (iT \beta^2 + \lambda) \quad (21)$$

となり、式⑬において、 $\gamma = \alpha \beta^2 T C = \lambda \alpha$ となる、

式⑬は、

$$\alpha = i \{ \partial \phi_i(P) / \partial Z_0 \} / \{ 1 + T \beta^2 I e^{i\delta_T} (1 - ic) \} \quad (22)$$

と書き換えられる。

3. 実験条件および方法

2次元造波水槽を使用し、シートについての室内実験を行った。シートは波の進行方向に5枚連続に並べて設置し、シート枠は、鉄製の細い丸棒を使用して製作した。使用した水槽及びシートについては、図-1、図-2の通りである。また、シートについてはシート長30(cm)とし、初期張力については、予め、シート長30(cm)に対する最適初期張力を測定し、 $T=26.7\text{kg/m}$ を使用した。水理条件としては、水深 $h=30\text{(cm)}$ 、シートの没水深比0.3の条件で波高は $H=6\text{(cm)}$ とした。また、周期は $T_0=0.6\sim 1.3\text{(s)}$ の間で10通りについて測定を行った。シート1枚、3枚および5枚に対するシートと波の位相差の測定値は実験時にシートの様子をビデオ撮影し、それを再生した画面から読み取った。測定方法としては、波の波頂部に基準線を置き、その状態を零としその時から次のシートの頂点が基準線に

到達するまでの時間をビデオのカウンターの値から読み取り、 δ (sec)とした。これより位相差(δ_T)は

$$\delta_T = 2\pi \times \delta / T_0 \text{ で表した。このとき } T_0 \text{ は実験波の}$$

周期である。この方法により、シート1枚、3枚、5枚それぞれの位相差を周期ごとに測定した。さらに、その値を同じ周期ごとに平均し、プロットしたのがシート5枚の場合図-3である。この値は全て、4.0付近の値を示している。そこで $\bar{\delta}_T$ を4.0として解析に使用した。同様の方法でシート1枚の場合は $\bar{\delta}_T=3.8$ 、シート3枚の場合は $\bar{\delta}_T=4.4$ という値を選定した。

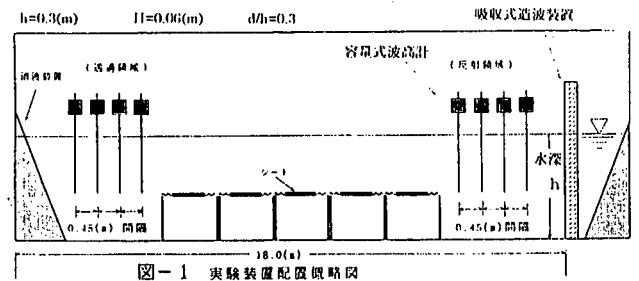


図-1 実験装置配置概略図

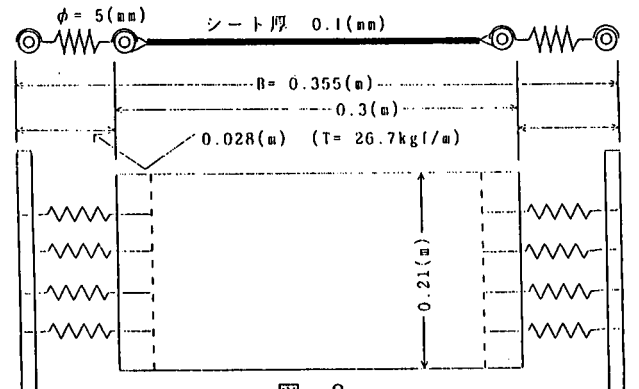


図-2

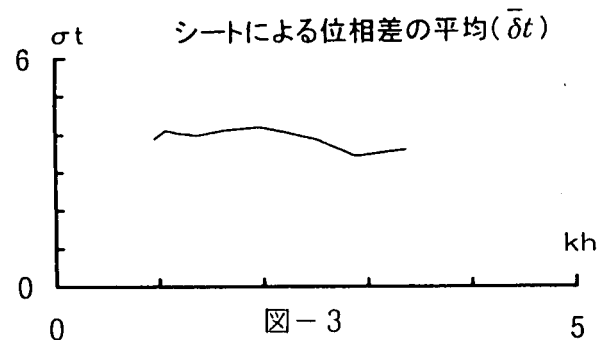
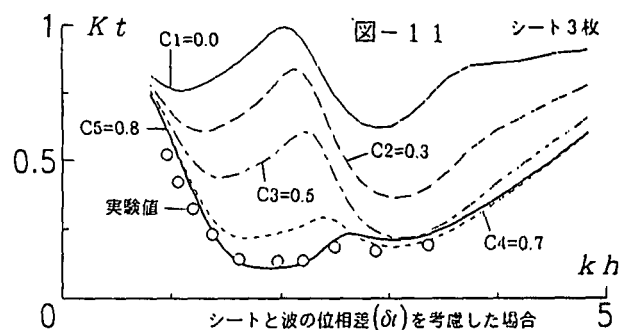
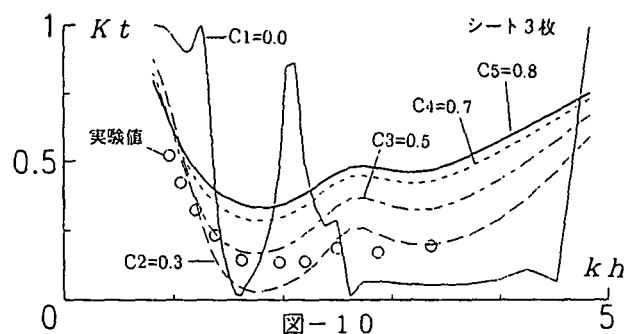
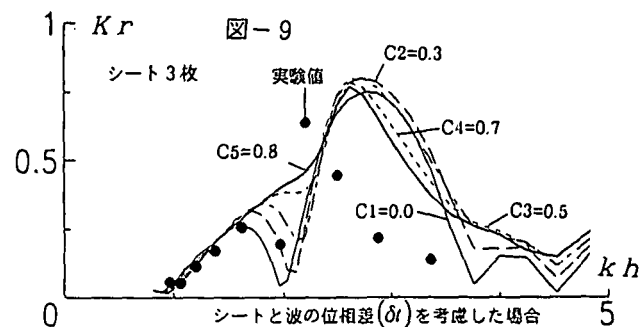
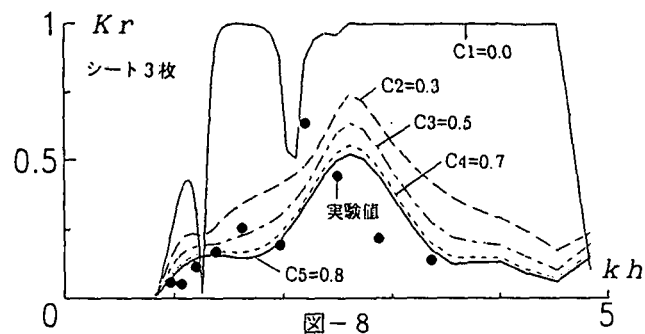
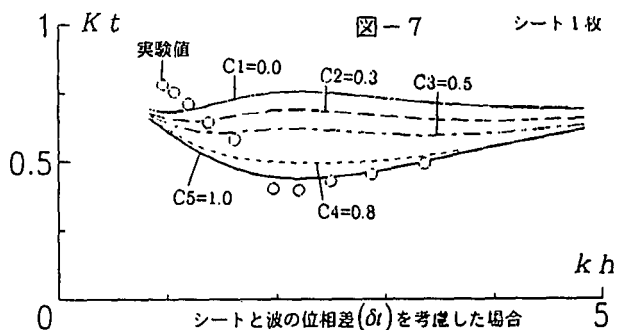
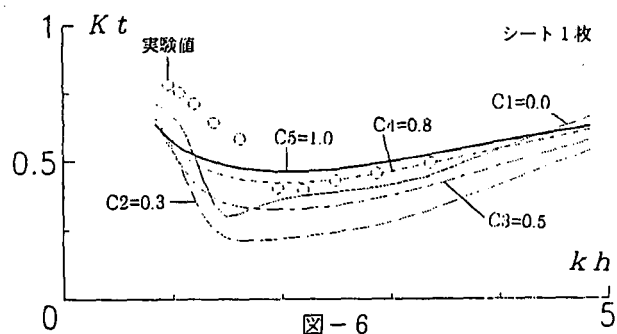
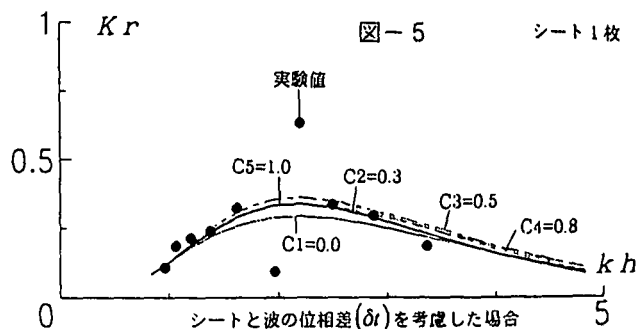
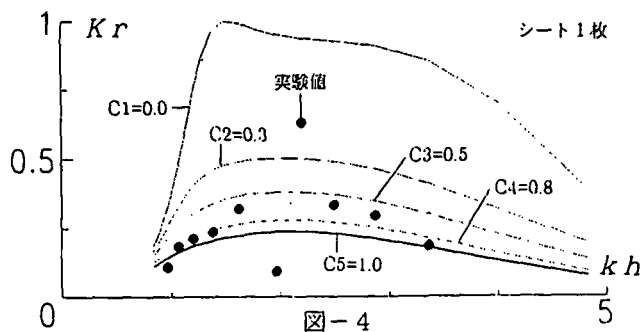


図-3

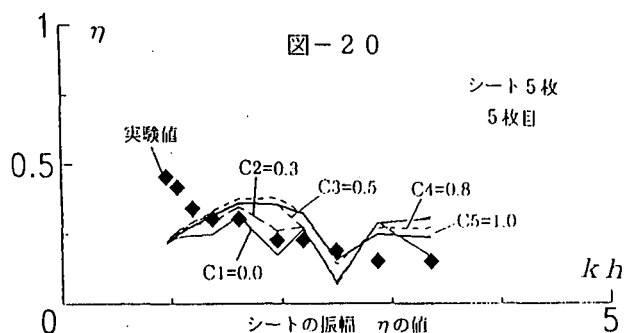
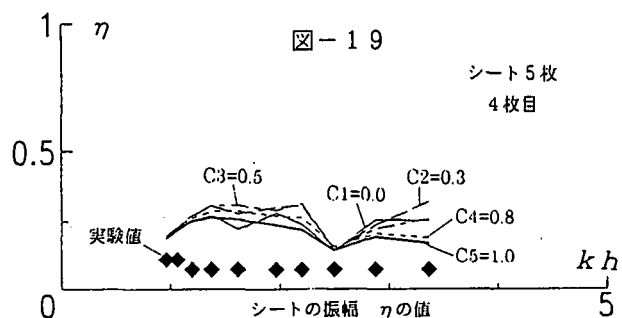
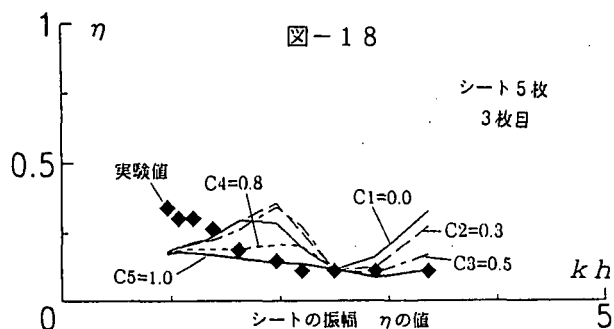
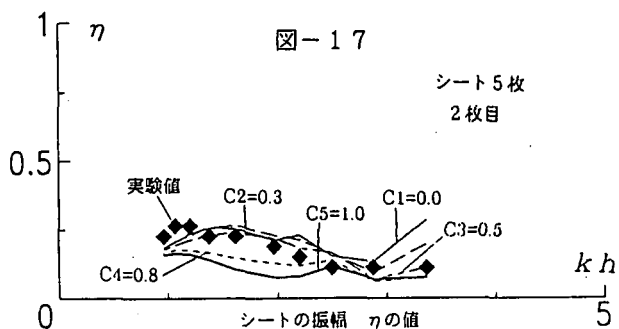
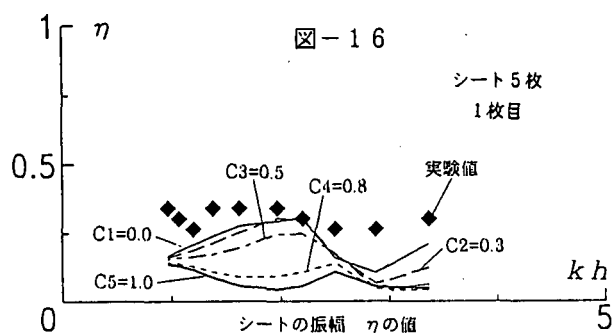
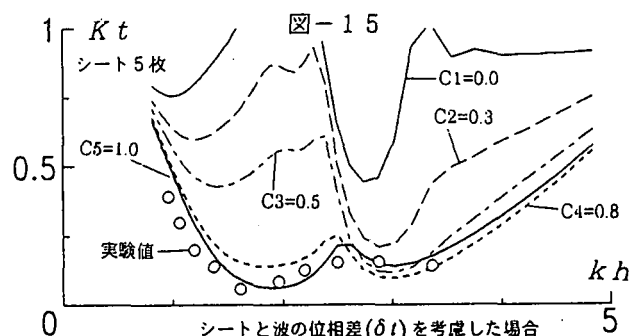
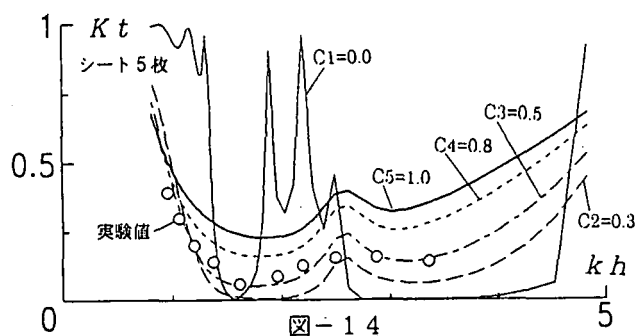
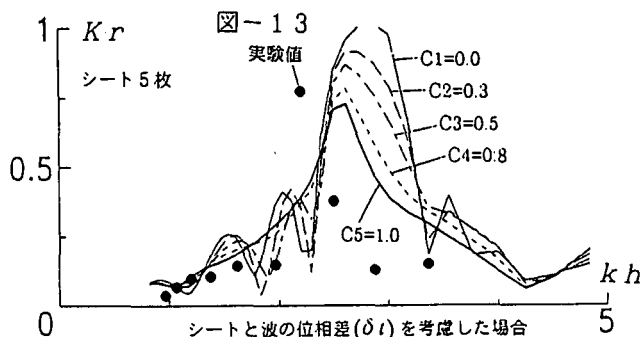
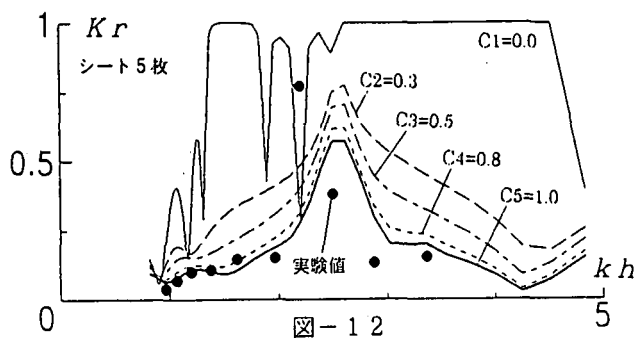
4. 解析および実験結果

解析と室内実験の結果は、反射率 K_r 、透過率 K_t について図-4～15に示した通りである。上からシート1枚、シート3枚、シート5枚の場合の解析結果である。それぞれの、左が δ_T を考慮しない場合の解析結果、右が δ_T を考慮に入れた場合の解析結果である。図-5はシート1枚の時の反射率である。実験値にバラつきがある $kh=2$ 前後を除けば、実験値とエネルギー



一係数 $C_5 = 1.0$ とした解析結果が、共になめらかな曲線を描き非常に良く一致していると言える。また、シートと波の位相差 $\delta\tau$ を考慮しない解析結果(図-4)と比べると、 Kr についてエネルギー係数の違いによるバラつきが無くなり、全て ($C_1 \sim C_5$) のエネルギー係数が、実験値にバラつきのある $kh = 2$ 前後を除けば実験値に非常に近い値を示している。特に $kh = 2$ 前後については、周波数特性が現れていると考えられる。しかし、その他の kh については、より実験値に近い値を示し、非常によい解析結果が得られている。図-7は同じ条件の透過率を示したものであり、エネルギー損失係数 $C_5 = 1.0$ の場合、 $kh = 2$ 付近までは若干のズレがあるが、解析結果は、ほぼ実験値と一致しているといえる。この場合の特徴として、実験値は、反射率、

透過率共にエネルギー係数が同じ値 $C_5 = 1.0$ の時の解析結果に良く一致している事が挙げられる。次にシート3枚の場合については、まず図-9の反射率について見ると、 $kh = 1.5$ 付近までは、全て ($C_1 \sim C_5$) の解析結果が実験値に非常に近い値を示している。しかし $kh = 1.5$ より大きい範囲では、解析結果は $C_2 = 0.3$ の場合が実験値に近い値を示しているが、いずれのエネルギー係数の場合もピーク時の絶対値が同程度の値を示す事を除けば、解析結果と実験値には大きな差異が見られ、シート3枚の場合の反射率については充分妥当な解析結果が得られた云い難い。一方、図-11の透過率については、 $C_5 = 0.8$ の場合に非常に良く一致する結果が得られたといえる。以上より、反射率および透過率の両者については、 $C_5 = 0.8$ の場合 $\delta\tau$ を



ない場合が図-12 および図-14 であり、 δ_T を考慮した場合は図-13 および図-15 である。図-12 において、 $C_5=1.0$ の反射率は計算結果と実験値が、大略的に一致しているが、図-14 においては、同一の $C_5=1.0$ の透過率が大きくズレている結果が得られているのに対して、 δ_T を考慮した場合の反射率(図-13) および透過率(図-15)では、同一の $C_5=1.0$ について、反射率に若干のズレが見られるが、透過率は良く一致し、全体的には δ_T を考慮した場合がより妥当な結果が得られていると云える。以上の反射率および透過率の解析結果を見ると、 δ_T を考慮した場合であっても、反射率に若干のズレが生じる事から、シートの各 1 枚毎の振動振幅 η を計算し、実験値と比較してみると、シート 5 枚の場合の 1 枚目～5 枚目それぞれにつ

考慮しない図-8 および図-10 と対比すると、 δ_T を考慮した図-9 および図-11 の方が全体的に解析結果は実験値と適合していると云える。次に、シート 5 枚の場合の反射率、透過率については、 δ_T を考慮し

いて、図-16 から図-20 に示したようになる。これらの図からシートの2、3、および5枚目については大略解析結果と実験値に一致した結果が得られたが、1枚目と4枚目(図-16, 19)では大きな差異が現れている。この事は各シート毎の位相差を平均した $\bar{\delta}_T = 4.0$ のみを使用して、各シートの振幅 η を計算している事に原因している事が考えられる。

5. まとめ

シートと波の位相差を考慮した解析結果から、シートの枚数が1枚、3枚、5枚について、同一のエネル

ギー損失係数(シート1枚および5枚の時 $C_s = 1.0$ 、シート3枚の時 $C_s = 0.8$)を使用して反射率 K_r および透過率 K_t を算出し得る事が分かった。また、本研究では、シートと波の位相差について、各シート毎の位相差 δ_T の平均値 $\bar{\delta}_T$ (シート1枚、3枚および5枚; $\delta_T = 3.8, 4.4$ および 4.0)を使用した。さらに精度の良い解析結果を得るためには、平均値 $\bar{\delta}_T$ ではなく、シート毎の位相差 δ_T を個別に使用の方が妥当であると考えられ、今後検討の余地があると思われる。

参考文献

- 1) 加藤雅也・浜中建一郎・佐藤幸雄 (1993); テキスタイル消波構造物の波浪制御特性の解析と実験, 海岸工学論文集, 第40巻(2), p632~636
- 2) 先川真一・佐藤幸雄・浜中建一郎 (1996); グリーン関数を用いたフレキシブルシート回りの波動場解析-断面2次元および3次元, 海洋開発論文集 Vol.12, p19~24