

II-73

フレキシブルシートの波浪制御効果とエネルギー損失について -2次元の場合-

北見工業大学 学生員 戸松 真介
 北見工業大学 正員 佐藤 幸雄
 北海道東海大学 正員 浜中 建一郎

1. まえがき

船舶の航行などを考慮した没水型波浪制御構造物の一つとして、没水平板やフレキシブルシート等が提案されている。特にフレキシブルシートはこれまでの報告により、ある程度の消波効果が示されている。著者らはこれまでこのフレキシブル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て波動場解析を行ってきたが、実験結果と解析結果を透過率、反射率について比較すると若干のズレが生じ、解析結果がフレキシブルシートの波浪制御特性を十分に数値化しているとは言えない。これはフレキシブルシート周辺でのエネルギー損失の効果が十分に考慮、表現出来ていないためであると思われる。そこで本研究では、このエネルギー損失の一つであると考えられる、波によるシートの振幅より求めた、シートと波の位相差を考慮し解析を行い、その結果を実験により比較検討するものである。但し、今回は解析、実験ともに、シートを5枚連続して並べた場合についてのみ行った。

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を仮定して、

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

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 $\Delta\phi = 0$

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

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

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

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、

$$G = C_0 e^{ik|z-z_0|} \cosh k(z_0 + h) \cosh k(z + h) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-k_n|z-z_0|} \cos k_n(z_0 + h) \cos k_n(z + h) \quad (2)$$

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

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を使い、 $S = S_1 + S_2 + S_f$ とし、

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

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

次にシートの上下面では以下のことが成り立つ。

$$\partial G / \partial \nu_1 = -\partial G / \partial \nu_2, \quad \partial \phi_1 / \partial \nu_1 = -\partial \phi_2 / \partial \nu_2$$

$$G|_{s_1} = G|_{s_2} \quad \text{これにより、③式は}$$

$$-\phi(P) = \int_{S_2} (\phi_2 - \phi_1) \partial G / \partial \nu_2 ds - \phi_i(P) \quad (4)$$

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

任意点での圧力は $p = -z - \partial\phi/\partial t$ ⑤

シートの上下面での圧力差は、⑤式より

$$\Delta P = p_1 - p_2 = -\partial\phi_1/\partial t + \partial\phi_2/\partial t = i(\phi_1 - \phi_2)e^{-it}$$
 ⑥

次にシートの上下面での鉛直張力は以下となる。

$$F_z = T\partial^2\zeta/\partial x^2 = -T\alpha\beta^2 \cos \beta x e^{-it}$$
 ⑦

⑥式と⑦式より $\phi_1 - \phi_2 = iT\alpha\beta^2 \cos \beta x$ ⑧

以上より、 α を決定すれば任意の位置でのポテンシャルが求まる。

(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。

$$\partial\phi(P)/\partial z_0 = \int_{S_2} (\phi_1 - \phi_2) \partial^2 G / \partial v_1 \partial z_0 dS + \partial\phi_1(P)/\partial z_0$$
 ⑨

次に、 P 点をシートの上下面の中央点 Q に近づける。

$$\partial\phi(P)/\partial z_0 = \partial\phi(P)/\partial z_0 \cdot e^{-it} = \partial\zeta/\partial t = -i\alpha e^{-it}$$
 ⑩

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

$$-i\alpha = iT\alpha\beta^2 \int_{S_2} \cos \beta x \partial^2 G / \partial z \partial z_0 dS + \partial\phi_1(P)/\partial z_0$$
 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

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

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

シートが複数枚ある時はそれぞれ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

$$x \leq -B/2, \quad x_0 \geq B/2 \quad \text{の時それぞれ、}$$

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

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

$$\phi(P) = iT\alpha\beta^2 J' K C_0 \cosh k(z_0 + h) \sinh k(z + h)$$
 ⑮

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

反射波のポテンシャルは

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

通過波のポテンシャルは

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

により求められる。

(6) Energy Loss のモデル化

鉛直流速が⑩より $\pi/2$ 位相のずれた成分

$$V' = \gamma \cos \beta x e^{-it}$$
 ⑱ とすると仕事は

$$W = -V'(P_1 - P_2) = \gamma T\alpha\beta^2 \cos^2 \beta x (e^{-2it} - 2 + e^{2it})$$

この仕事境界層内で発生する Energy Loss となる。この時⑱式の γ は、

$$\gamma = \alpha\beta^2 T C$$
 ⑲ となり、これより α は

$$\alpha = i \partial\phi_1(P)/\partial z_0 / \{1 + T\beta^2 (I + iC)\}$$
 ⑳

となる。ここで、 C ; 定数

3. 実験条件および方法

理論解析を行うと同時に、2次元造波水槽を使用し、シートについて室内実験を行った。シートは波の進行方向に5枚連続に並べて設置した。シート枠は、実験に影響が無く、且つ強度の強いことを考慮して鉄製のものを製作し、使用した。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、従来使用してきた物より若干長めの物を使用し、初期張力についても本実験の予備実験として、シート長 30(cm)に対する初期張力を予め測定し、最適の値を使用した。水理条件としては、水深 30(cm)、シートの没水深 0.3 の条件で波高 4(cm)と 6(cm)の波を起し周期は 0.6~1.3(s)の間で 10 通りについて測定を行った。

4. 解析および実験結果

解析の結果として反射率(K_r)、透過率(K_t)、エネルギー損失量(KL^2)を図 3, 4 及び 5 にグラフで示した。まず反射率を実験値と比較すると、エネルギー係数 1.0 すなわち、 c_1 の時はほぼ類似しているという事がいえる。しかしピーク値の大きさにズレがあり、また kh の値が大きくなる(周期が短くなる)につれズレが生じる結果となった。透過率はエネルギー係数 0.5 すなわち、 c_1 の時にほぼ一致した曲線を示している。透過率だけを見れば十分な結果であるといえる。しかし解析結果全体を見ると反射率、透過率のそれぞれは、ほぼ一致するエネルギー係数値が存在するが、合わせて検討した場合に K_r, K_t が同時に一致するエネルギー係数値が存在しないということがいえる。これは例えばエネルギー係数の値を変えたとしても同じ結果となる。この事は、この解析法が未だ十分にシートの波浪制御特性を示しているとはいえない。これは解析においてシートの変位の取り扱いに要因があると考えられる。やはりエネルギーロスの大いなる要因はシートの動きにあるということが、室内実験を行ってきた結果、明らかであり、シートの変位がシートの圧力差、ポテンシャルに大きく関係するため、シートの変位を考慮してエネルギーロスを考える必要がある。この点を改良し、あらたに解析を行うこととした。

5. シートと波の位相差を考慮した場合

室内実験との比較から分かる様に、2章での解析では未だ十分にエネルギー損失の効果が表現出来ていないということが言える。そこでエネルギー損失効果の一つであると考えられるシート振幅に、シートと波の位相差を考慮したものを使用、それ

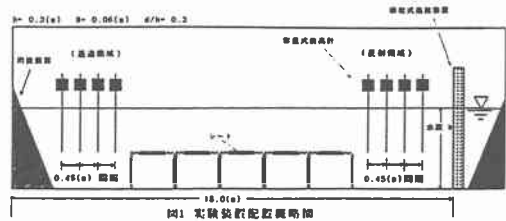


図1 実験装置概観図

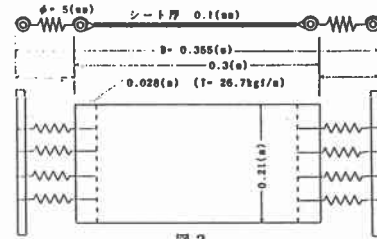


図2

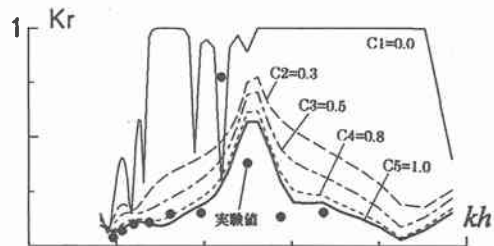


図-3 シートと波の位相差(δt)を考慮しない場合
シート 5枚 $H=0.06(m)$ $d/h=0.3$ 水深 $(h)=0.3(m)$

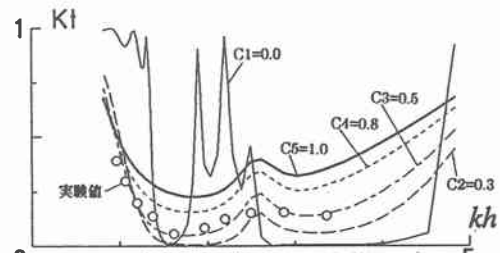


図-4 シートと波の位相差(δt)を考慮しない場合
シート 5枚 $H=0.06(m)$ $d/h=0.3$ 水深 $(h)=0.3(m)$

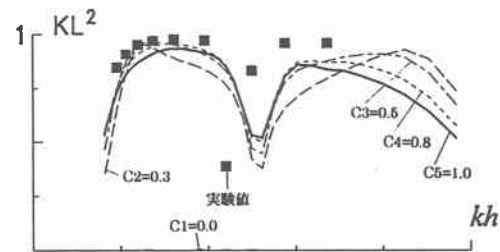


図-5 シートと波の位相差(δt)を考慮しない場合
シート 5枚 $H=0.06(m)$ $d/h=0.3$ 水深 $(h)=0.3(m)$

と共に圧力方程式を求める際のシートの鉛直張力についてもエネルギー損失効果を取り入れたものを使用して、改めて解析を行い検討することとした。まず2章で示されているシートの変位、すなわちシート振幅を

$$\xi = \alpha \cos \beta x e^{-i(t-\delta_T)/T} \quad \text{とおく。}$$

(δ_T はシートと波の位相差を表すものとする)

さらに⑦式のシートの鉛直張力について、シート周辺でのエネルギー損失効果を取り入れるために、シートの鉛直変位速度に比例する抵抗 $-\lambda \alpha \xi / \partial t$ が作用すると仮定すると

$$F_z = T \partial^2 \xi / \partial x^2 - \lambda \partial \xi / \partial t \quad \text{⑦'}$$

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

となる。これにより⑧式は

$$\phi_1 - \phi_2 = iT \alpha \beta^2 \cos \beta x e^{i\delta/T} + \lambda \alpha \cos \beta x e^{i\delta/T} \quad \text{⑧'}$$

したがって、⑩式は

$$-i\alpha = \left(iT \alpha \beta^2 + \lambda \alpha \right) e^{i\delta/T} \int S_2 \cos \beta x \partial^2 G / \partial z \partial z_0 dS \quad \text{⑩'}$$

$$+ \partial \Phi_I(P) / \partial z_0$$

⑩'より、積分の部分を I と置いて変形すると

$$-i\alpha = \left(iT \alpha \beta^2 + \lambda \alpha \right) e^{i\delta/T} I + \partial \Phi_I(P) / \partial z_0$$

$$\alpha \left\{ 1 + T \beta^2 e^{i\delta/T} \left(I - i \lambda / T \beta^2 I \right) \right\} - i \partial \Phi_I(P) / \partial z_0$$

結果として、求めるべき未知数 α は上式より

$$\alpha = i \partial \Phi_I(P) / \partial z_0 / \left\{ 1 + T \beta^2 e^{i\delta/T} (I - iC) \right\} \quad \text{⑳'}$$

となる。ここで C はエネルギー損失係数を

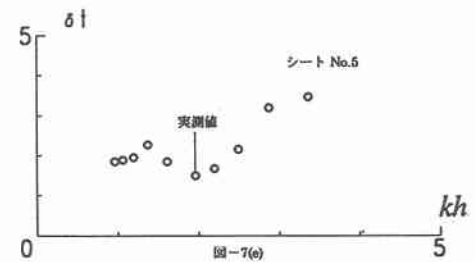
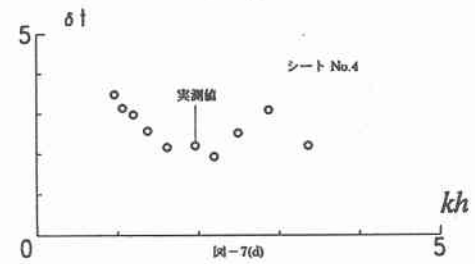
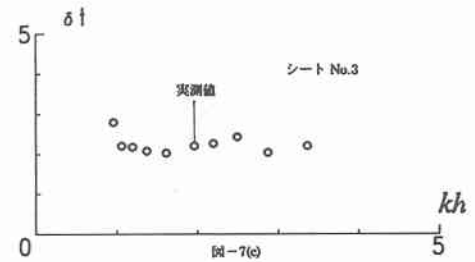
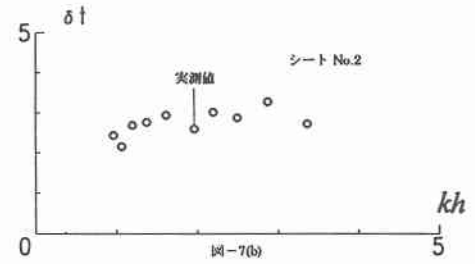
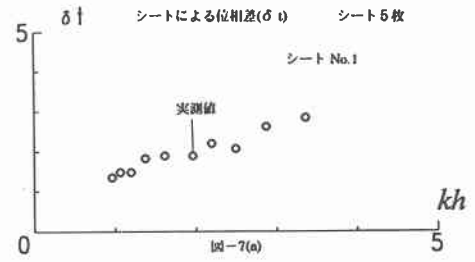
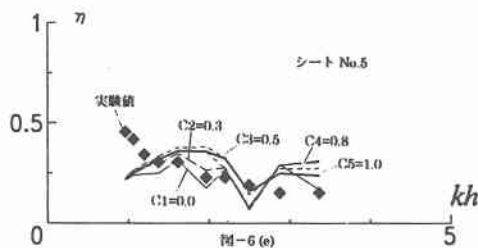
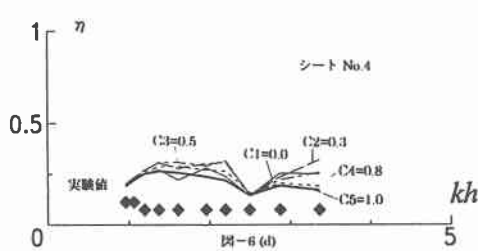
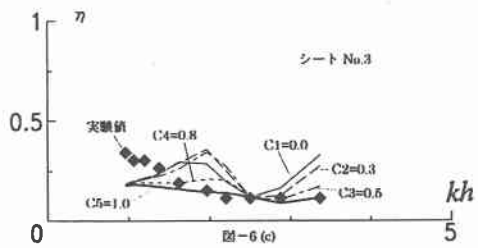
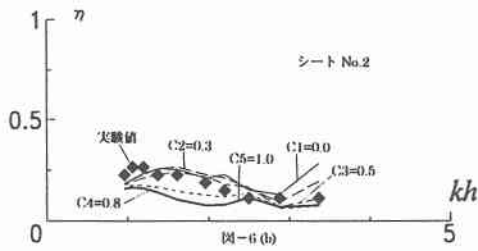
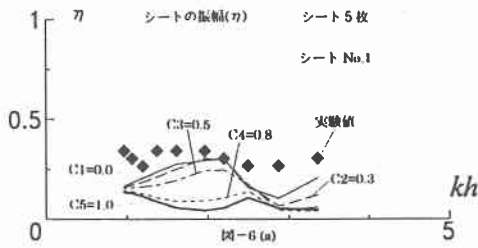
$$\text{表わし、} C = \lambda / T \beta^2 I \quad \text{とする。}$$

6. シートと波の位相差を考慮した場合の検討

5章に於いてシートと波の位相差を考慮した解析を行ったが、位相差(δ_T)の値は、実際に室内実験により測定した値を使用した。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、シート

の中心に基準線を置き、その基準線上のシートの振れが最上点にある状態を零としそのときから次の波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 $\delta_T = 2\pi \times \delta / T$ で表

した。このとき T は実験の周期である。これをシート5枚それぞれの位相差を周期ごとに測定した。 δ_T の測定値を図に示すと5枚のシートについて図7(a)~(e)のようである。その値を同じ周期ごとに平均し、プロットしたのが図8である。この図8の平均値は全て、ほぼ2.2付近の値を示している。 $\delta_T = 2.2$ の値を⑳'に代入した場合、 K_r, K_t 共に絶対値にはズレが生じるが、エネルギーロスの影響は実験値に沿った傾向が得られた。そこで δ_T の値を適当に、徐々に増加させて計算を行ったところ適当な値として $\delta_T = 2.2$ の約2倍の $\delta_T = 4.1$ が見出された。また、この解析では実験の結果(反射率、透過率)と同時に位相差を考慮したシートの振幅(つまり⑳'式)についても、ビデオ画面から測定した測定値との比較を行った。シート振幅の測定は、再生画面と実際のシートの比率を考えた上で、シート中心の振幅を A とし、 $A/2$ をシート振幅(η)として行った。これらを踏まえて解析の結果を、図6(a)~(e)、図9~図11、に示した。まず図9を見ると、反射率はエネルギー係数の違いによるばらつきが小さくなり、全体に比較的实验値に沿っていて、まとまった結果となった。又、ピーク時の値が実験値のそれとほぼ近い結果となった。エネルギー係数1.0すなわち c_s の時にほぼ類似しているという事が言える。ただし、前の解析と同様に kh が大きくなる(周期が短くなる)と共に、特にピーク時以降で実験値と多少のズレが生じると言える。また透過率は逆に、エネルギー係数の違いによるばらつきが大きい結果となった。しかし、エネルギー係数1.0すなわち c_s のときは、ほぼ測定値と一致した曲線を示している。全体として、最も注目すべき点は反射率、透過率が共に、エネルギーロスが同じ値(この場合 $c_s = 1.0$)で実験値とほぼ一致したという点である。これは本解析の妥当性が比較的高いことを示している。エネルギー損失量のグラ



フも実験値と合わせて図 11 に示したが、このグラフのエネルギー係数 1.0 すなわち、 c_s の曲線を見ると、共振点が僅かにずれているものの、ピ

ーク後は再び増加の傾向を示し、実験値とほぼ一致した結果となっている。したがってこの点からも高い妥当性が認められる。しかしながら、反

射率における解析に若干のズレがあるのは代入する位相差 δ_T の値、並びに解析方法、さらには反射領域近くに発生している渦による影響などが考えられる。これを改良すればエネルギー損失量のグラフについてもさらに良い解析結果が示されるといえる。

7. 結論

反射率、透過率が共に $C_s=1.0$ の同じエネルギーロス値により実験値と解析結果が一致したという点に大きな特徴があるように、従来の解析法にシートと波の位相差を考慮して解析することにより、より精度が良く、妥当性の高い結果を得ることができたといえる。シートと波の位相差によるエネルギーロスを考慮することが解析に非常に重要で、不可欠な要素であるということが示された。しかしながら、本解析に於いても、図9,10,11から分かる様に kh が2を過ぎたあたりから、ズレが生じており、さらに改良の必要があるといえる。これについては6章でも述べたように、使用する位相差の値や解析方法などが考えられる。それを表す結果として図6(a)~(e)に本解析における(位相差を考慮した)シート振幅をシート別に示した。反射率、透過率に於いて実験値とほぼ同じ値を示した $C_s=1.0$ について見ると、シートNo.2,3については実験値と大きな差は無いが、シートNo.4,5、シートNo.1では明らかに大きな差異を示している。したがって、精度を上げるためには、シートについて別々の δ_T を使用する等の解析を行う必要があると考えられる。今後この点を改良することが必要であると考えられる。

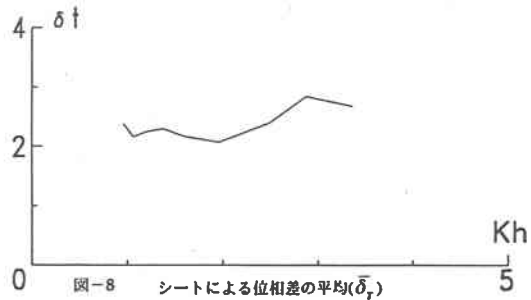


図-8 シートによる位相差の平均($\bar{\delta}_T$)

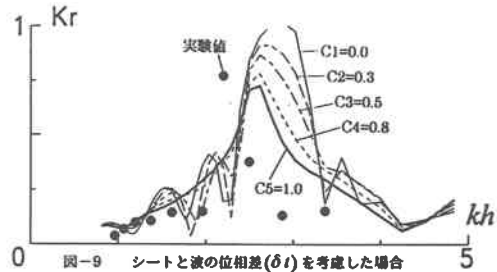


図-9 シートと波の位相差(δ_T)を考慮した場合

シート5枚 $H=0.06(m)$ $d/h=0.3$ 水深 $(h)=0.3(m)$

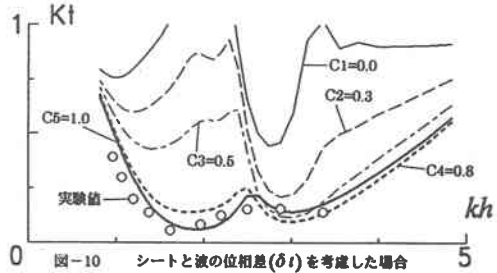


図-10 シートと波の位相差(δ_T)を考慮した場合

シート5枚 $H=0.06(m)$ $d/h=0.3$ 水深 $(h)=0.3(m)$

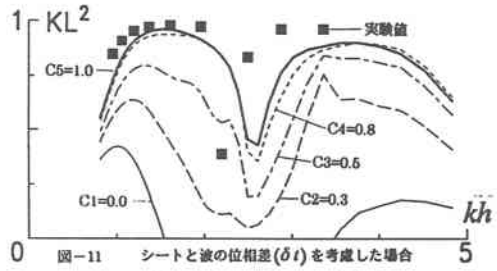


図-11 シートと波の位相差(δ_T)を考慮した場合

シート5枚 $H=0.06(m)$ $d/h=0.3$ 水深 $(h)=0.3(m)$

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