

## II-72

## フレキシブルシート周辺の波高分布に対する検討

北見工業大学 工学部 学生員 橋本 孝治

北見工業大学 工学部 正員 佐藤 幸雄

北海道東海大学 工学部 正員 浜中 建一郎

## 1. はじめに

小型船舶の航行および海洋上の景観を損わない波浪制御構造物として従来より潜堤あるいは水平板を用いた構造物、その他種々の没水型構造物が考えられている。その中で本研究に用いる構造物は、フレキシブル（可撓性）シートの両端にスプリングを取り付けたタイプのモデルであり、数年前より2次元的に実験を行い波浪制御特性を調べて来た。そして、加藤・浜中（1993）のポテンシャル接続法による解析では、解析と実験が良く合致していて、解析の妥当性が述べられている。更に、シートを3枚程度連続させた場合はシート上で進行波は大きく阻止されること、没水深が深く入射波が構造物上で砕波しない場合でも水平板に比べ、幅広い周波数帯で透過率が減少することが見出されている。また、実海域に適用させるため3次元に拡張し実験および解析を行った佐藤・橋本・浜中（1997）では、フレキシブルシートの波浪制御効果が3次元的にはどのように現れるかをシート周辺の波高分布状況より検討し、実験結果と計算結果との比較検討から解析方法の妥当性が確認された。この場合の解析方法はグリーン関数を用いた境界要素法であり、先川・佐藤・浜中（1996）において詳細に述べられている。

本研究では、シートを複数設置した場合を想定しエネルギー損失を考慮した解析を行い、3次元平面水槽を使用して実験し解析方法の妥当性を確かめるとともに、入射波方向に対するシート構造物の長さや波長の関係およびシート周辺の波高分布形成に対して考察した。

## 2. 実験装置および実験方法

実験水槽には3次元平面水槽を使用し、水槽の大きさは図-1に示すように横4.6 m、長さ11.0 m、深さ0.7 mである。造波機はフラッター式のもので造波板に対向した他端には小砂利を使用した傾斜消波帯を設置し、また両側壁にはヘチマロン3段階積みの消波帯を設けた。つぎに、使用したシートの大きさは正角 $BL=0.30$  mであり、図-2に示すように、5枚を連続してシート取付け枠に固定し1個のシート列とした。シートの設置箇所と方法については、平面水槽のほぼ中央付近に造波板に平行にシート取付け枠を設置した場合について行い、シート列を3列並べて実験を行った。シート列を並べる際、シート列とシート列の間隔（シート列間隔）を $IL=0.150$  m、 $0.225$  m、 $0.300$  mと3通り変化させて設置した。図-3はシートをシート取付け枠に取付けた場合のシート1枚についての拡大図を示したものである。

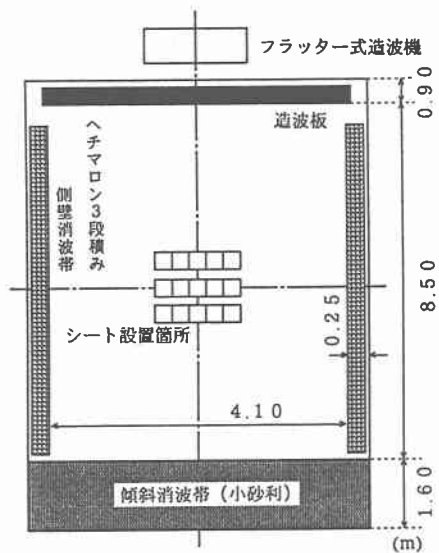


図-1 実験水槽

Study on Wave Height Distribution around a Flexible Sheet ,  
by Koji HASHIMOTO , Yukio SATO and Ken-ichiro HAMANAKA

実験に使用した入射波は表-1  
に示すように、周期 $T=0.60\text{ sec}$ 、  
波長 $L=0.560\text{ m}$ と周期 $T=1.00\text{ sec}$ 、  
波長 $L=1.372\text{ m}$ の  
2種類である。入射波波高 $H_0$ は共  
に $3\text{ cm}$ 程度である。入射波の選定  
は数値解析による波高のContours

表-1 実験の諸元

水深 $h=30\text{ cm}$

周期 $T(\text{sec})$	入射波平均 波高 $H_0(\text{cm})$	波長 $L(\text{m})$	無次元初期 張力 $PT'$	$BL/L$	シート列間隔 $IL(\text{m})$	TYPE	
						$d=9\text{cm}$	$d=15\text{cm}$
0.60	3.2	0.560	3.343	0.536	0.150	A 1	A 4
					0.225	A 2	—
					0.300	A 3	—
1.00	2.7	1.372	0.433	0.219	0.150	B 1	—
					0.225	B 2	—
					0.300	B 3	B 4

図をもとに、波浪制御効果の高く現れている場合の入射波と  
した。このときシートに加えた初期張力 $PT$ はシート1枚に  
付き、周期に関係なく $PT=26.7\text{ kg/m}$ とし、スプリングを  
片側4個使用した。この場合の初期張力の選定には、2次元  
の実験において幅広い周波数帯で波浪制御効果が高いと確  
認された $PT$ の値を使用した。水深は $h=30\text{ cm}$ で一定とし、  
シートの没水深 $d$ は $d=0.3h$  ( $9\text{ cm}$ )と $d=0.5h$  ( $15\text{ cm}$ )  
の2種類で実験を行い、各TYPEについては、周期 $T=$   
 $0.60\text{ sec}$ の場合をTYPE-A、 $T=1.00\text{ sec}$ の場合を  
TYPE-Bとした。更に、シート列間隔と没水深によって各  
TYPEを1~4までTYPE分けを行い、全8TYPEについて  
各測点での波高を測定した。

図-4は、シート構造物まわりの波高測定範囲の規模とシ  
ート取付け枠の大きさを対比させるために示したシート列  
間隔 $IL=0.150\text{ m}$ の場合の図である。図中の波線で描か  
れた矩形部分がシート取付け枠である。図の測定点を示すメ  
ッシュは縦方向に $10\text{ cm}$ 間隔で48箇所、横方向に $15\text{ cm}$ 間  
隔で25箇所であり波高の測点は計 $1200$ 点である。各  
TYPEとも同じメッシュ間隔で実験を行った。入射波方向は  
矢印方向の図の上方から下方に進む状態としている。

波高の測定はトロッコ上に $20\text{ cm}$ 間隔で取付けられた1  
2本の容量式波高計を使用し、1回にメッシュの縦方向ライ  
ンの12点の測点の波高を測定した。この操作をトロッコを  
横方向に1点ずつ移動させながら縦方向ライン25本の測  
定を行い、この作業を縦方向に沖側、岸側ともに2回ずつ計  
4回外枠を移動させることで全測点での観測を行った。造波  
機はトロッコを移動させる都度駆動させるようにした。その  
様子を図-5に示す。

また、造波板から発生する入射波は平面的に一樣でないた  
め、シート構造物が設置されていない状態でシート設置箇所  
の全範囲についてメッシュ上の波高を測定し入射波波高 $H_0$   
として各TYPEの実験波高を同メッシュ上の入射波波高の  
比で表すこととした。

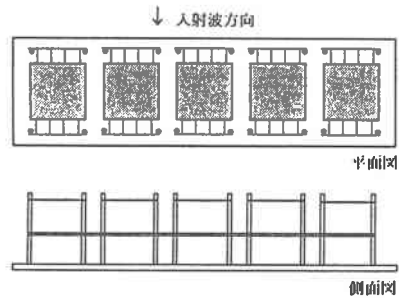


図-2 シート取付け状態

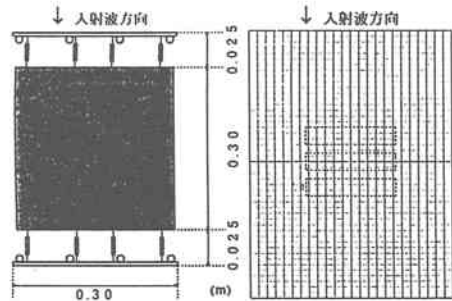


図-3 シートの拡大

図-4 測定範囲

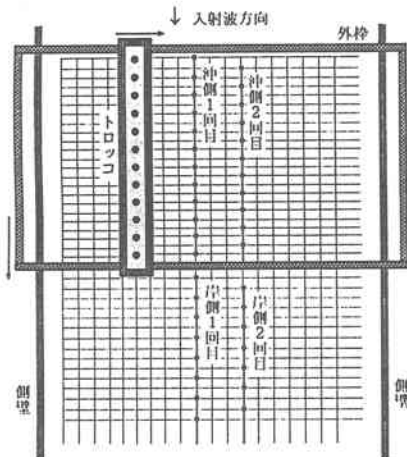


図-5 測定方法

### 3. 解析方法の概要

グリーン関数を使用したシート周りの波動場解析に関する理論の詳細については先川・佐藤・浜中(1996)を参照して頂くこととし、ここでは、シート複数枚のときの3次元波動場の波高計算法についてとエネルギー損失のモデル化(モデル式)について若干述べることにする。

いま、シートが複数枚(N枚)あるとき、各シートの中央部に特異点 $(x_0, y_0, z_0)$ を配置し、その点のシートの振幅(未知数)を各シートについて、 $a_1, a_2, \dots, a_N$ とする。シートの変位 $\zeta$ は2辺にスプリングを取付けた2辺固定の場合であるから、以下のようなになる。

$$\zeta_j = a_j \cos \beta x e^{-it} \quad \dots (1)$$

$$\beta = \pi/l, \quad l; \text{シート長}$$

特異点を配置したシートをi番目とし、各シートについて積分を施すとき、そのシートをj番目のものとする。シートの振幅 $a_1 \sim a_N$ に関しては次式のような関係式が得られる。

$$i_c a_i = i_c T_0 \beta^2 \sum_{j=1}^N a_j \int_{S_j} \cos \beta x \frac{\partial^2 G_{ij}}{\partial z \partial z_0} ds + \frac{\partial \phi_i(P_i)}{\partial z_0} \quad \dots (2)$$

式(2)中の $G_{ij}$ は3次元グリーン関数で次式となる。

$$\frac{\partial^2 G_{ij}}{\partial z \partial z_0} = -\frac{k_0^2}{2i_c h(k_0^2 - 1)} \frac{k_0^2 - 1}{(k_0^2 - 1) + 1} \sinh k_0(z_0 + h) \sinh k_0(z + h) H_0^{(1)}(k_0, r_{ij}) \quad \dots (3)$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n^2}{\pi} \frac{k_n^2 - 1}{h(k_n^2 - 1) - 1} \sin k_n(z_0 + h) \sin k_n(z + h) K(k_n, r_{ij})$$

ここで、 $r_{ij}$ は特異点からの距離、 $H_0^{(1)}$ は第1種0次ハンケル関数、 $K$ は第2種変形ベッセル関数である。また、 $\phi_i(P_i)$ はi点における入射波ポテンシャルである。

式(2)中の各シートについての積分を

$$\int_{S_j} \cos \beta x \frac{\partial^2 G_{ij}}{\partial z \partial z_0} ds = I_{ij} \quad \text{と} \quad \text{おいて、}$$

$I_{ij}$ の値を予め式(3)を使用して数値積分により求めておく。この場合、特に $i=j$ のときは $r_{ij} \rightarrow 0$ となるため、

3次元グリーン関数の主要解を使用した主値積分となる。

以下をまとめると式(2)は特異点がi番目にあるとき

$$\sum_{j=1}^N A(i, j) a_j = B(i), \quad B(i) = \frac{\partial \phi_i(P_i)}{\partial z_0} \quad \dots (4)$$

の形となり、式(4)のN元連立方程式を解くことにより、各シートの振幅 $a_1 \sim a_N$ が決定される。

つきに、シート周辺波動場の任意点Pにおける水面ポテンシャル $\phi(P_i)$ を求める方法としては、

$$\phi(P_i) = i_c T_0 \beta^2 \sum_{j=1}^N a_j \int_{S_j} \cos \beta x \frac{\partial G_{ij}}{\partial z_0} ds + \phi_i(P_i) \quad \dots (5)$$

であり、式(5)を使用して水面ポテンシャルを求めるとき、式(5)中の各シートについての積分値を

$$\int_{S_j} \cos \beta x \frac{\partial G_{ij}}{\partial z_0} ds = J_{ij} \quad \text{と} \quad \text{おいて、}$$

求める計算点をi番目、各シートの中央点をj番目として、予め $J_{ij}$ を求めておくと、

$$\phi(P_i) = i_c T_0 \beta^2 \sum_{j=1}^N a_j J_{ij} + \phi_i(P_i) \quad \dots (6)$$

となり、式(6)により水面のポテンシャルが求められる。この場合、 $z_0=0$ ,  $z=-d$ ,  $d$ ; 没水深である。

波動場の各測点における波高 $H(P_i)$ は

$$H(P_i) = |\phi(P_i)| \quad \dots (7)$$

の形に書くことが出来る。結局、式(7)を使用して計算波高 $H$ を求めた。

次に、エネルギー損失のモデル化について説明する。実際のエネルギー損失は、シート端部で発生する剥離渦によるものと考えられるが、渦を直接モデル化するのは難しいため、この場合、すべてのエネルギーロスは、シートの上下面の境界層内で起こるとしてモデル化する。境界層の外側の流体が境界層に対してなす仕事を、 $V$  (流速) と  $P$  (圧力) を用い共役複素数を考慮して求めると1周期では仕事をしないことがわかる。

$$W = \gamma T \alpha \beta^2 \cos^2 \beta x (e^{-2i\omega t} + 2 + e^{-2i\omega t}) \quad \dots (8)$$

となり、1周期の間では、外側の流体は境界層に対して正の仕事をやる。この仕事が境界層内で発生するエネルギーロスとなる。

次に、式(8)の $\gamma$ をモデル化することを考える。ここでは、加藤・浜中(1994)と同様

$$\gamma = \alpha \beta^2 TC, \quad C: \text{エネルギー損失係数 (C.E.L.)}$$

とする。エネルギー損失を考慮した解析は、積分値 $I_{ij}$ を $I_{ii}$ に限り

$$I_{ii} = I_{ii} + iC$$

とし、 $I_{ii}$ を用いることで計算できる。

#### 4. 計算結果および実験結果

計算条件は実験条件(表-1)と同一条件で行っている。入射波高 $H_0$ を1として計算を行った場合のシート周辺の波高分布をContours図で示すと図-6、実験値による波高分布をContours図で示すと図-7、そして、計算値と実験値の差(計算値-実験値)をContours図で示すと図-8のようになる。TYPE-A1、TYPE-A3、TYPE-B1 および TYPE-B3 に相当する図はそれぞれの図の(a)、(b)、(c)および(d)である。

それぞれの図の中央部にある波線で示す矩形部分は実験におけるシート取り付け枠の設置位置を示すものである。図-6にあるC.E.L.は計算に用いたエネルギー損失係数であり、C.E.L.を何通りか変え計算を行い実験による波高分布状況と一致するようなC.E.L.を用いた。本研究で採用したC.E.L.は、 $T=0.6\text{sec}$ の場合0.20程度で実験値に一致したのでC.E.L.=0.20とし、同様に $T=1.0\text{sec}$ の場合C.E.L.=0.30とした。この結果から、C.E.L.は周期が長くなるほど大きな値になると思われる。図-6および図-7に示してある $R_{\text{max}}$ は沖側波高の各メッシュ上の値を大きい方から3つ取り出し平均した値であり、 $T_{\text{ave}}$ はシート構造物を通過した岸側範囲の平均波高である。図-8の $G_{\text{ave}}$ は<計算値-実験値>の絶対値を平均した値である。

TYPE-A1 ( $T=0.6\text{sec}, IL=0.150\text{m}, d=0.09\text{m}$ )    TYPE-A1 ( $T=0.6\text{sec}, IL=0.150\text{m}, d=0.09\text{m}$ )    TYPE-A1 ( $T=0.6\text{sec}, IL=0.150\text{m}, d=0.09\text{m}$ )

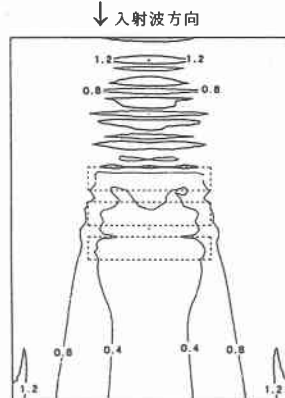


図-6(a) 波高のContours (計算値)

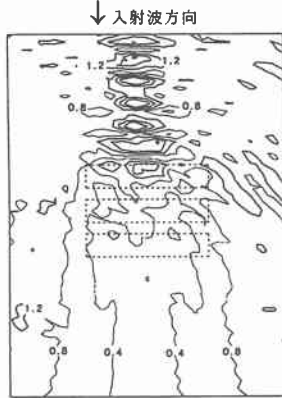


図-7(a) 波高のContours (実験値)

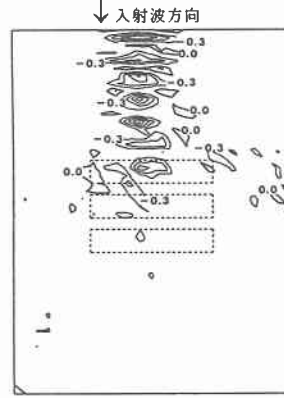
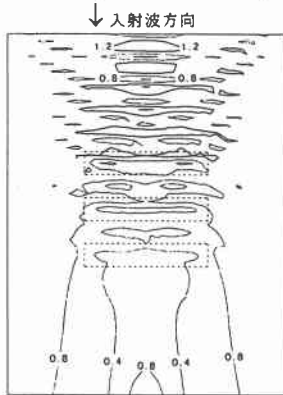


図-8(a) 波高差のContours (Cal-Exp)

TYPE-A3 (T=0.6sec,IL=0.300m,d=0.09m)



<C.E.L.=0.2, Rmax=1.597, Tave=0.308>

図-6(b) 波高のContours (計算値)

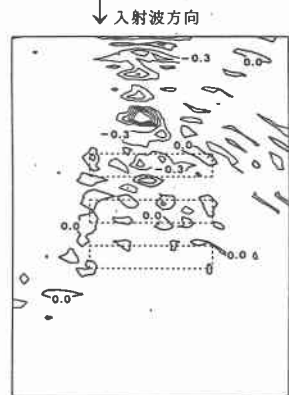
TYPE-A3 (T=0.6sec,IL=0.300m,d=0.09m)



<Rmax=2.876, Tave=0.242>

図-7(b) 波高のContours (実験値)

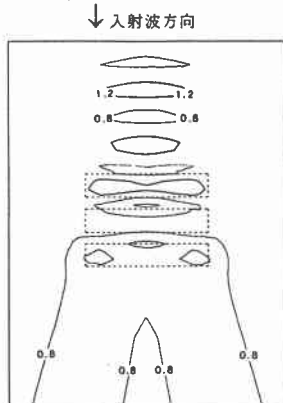
TYPE-A3 (T=0.6sec,IL=0.300m,d=0.09m)



<Gave=0.170>

図-8(b) 波高差のContours (Cal-Exp)

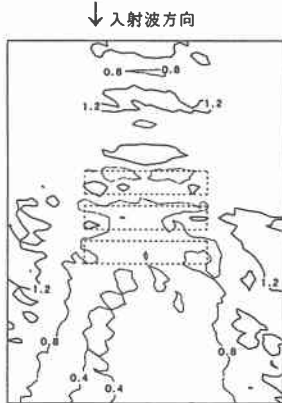
TYPE-B1 (T=1.0sec,IL=0.150m,d=0.09m)



<C.E.L.=0.3, Rmax=1.310, Tave=0.750>

図-6(c) 波高のContours (計算値)

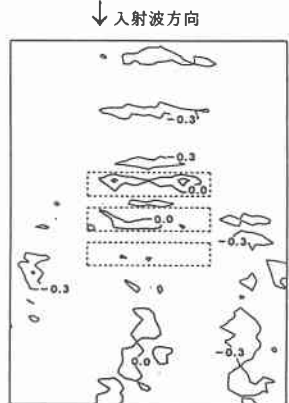
TYPE-B1 (T=1.0sec,IL=0.150m,d=0.09m)



<Rmax=1.396, Tave=0.491>

図-7(c) 波高のContours (実験値)

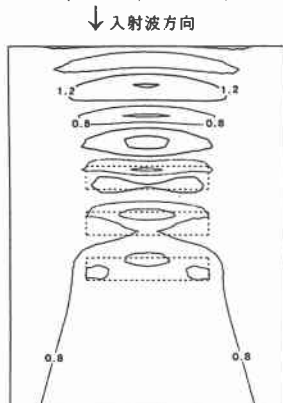
TYPE-B1 (T=1.0sec,IL=0.150m,d=0.09m)



<Gave=0.153>

図-8(c) 波高差のContours (Cal-Exp)

TYPE-B3 (T=1.0sec,IL=0.300m,d=0.09m)



<C.E.L.=0.3, Rmax=1.692, Tave=0.659>

図-6(d) 波高のContours (計算値)

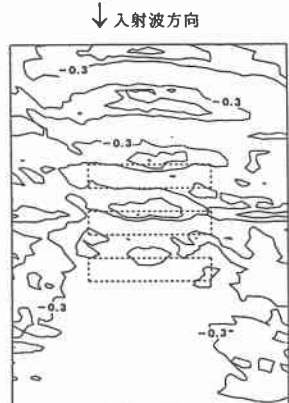
TYPE-B3 (T=1.0sec,IL=0.300m,d=0.09m)



<Rmax=2.158, Tave=0.521>

図-7(d) 波高のContours (実験値)

TYPE-B3 (T=1.0sec,IL=0.300m,d=0.09m)



<Gave=0.280>

図-8(d) 波高差のContours (Cal-Exp)

TYPE-A1 は  $T=0.6\text{sec}$ 、 $IL=0.150\text{m}$  の場合であり、反射域での重複波の形成や透過域での低波高帯の広がりなど計算と実験ではほぼ一致し、透過率  $K_T=0.4$  以下の部分が多く波浪制御効果が高いことを示している。しかし、差の Contours 図を見ると透過域での一致は確認できるが反射域ではかなりの差が生じている。これは、入射波がシート列に垂直に入射せず傾いて入射し重複波の形成位置がずれるために生じたものである。また、重複波の形成範囲は実験の方が狭く波高も高くなっており計算値とはやや様子が異なっている。TYPE-A3 は  $T=0.6\text{sec}$ 、 $IL=0.300\text{m}$  の場合であるが TYPE-A1 と同様なことが云える。しかし、計算、実験ともに低波高域でやや高い波高帯が存在しており、TYPE-A1 に比べると波浪制御効果が低いことを示している。TYPE-B1 は  $T=1.0\text{sec}$ 、 $IL=0.150\text{m}$  の場合である。実験では透過域に 0.4 程度の低波高帯があり 0.8 程度の高い波高が存在せず、波高分布形成に違いがあるが、差の Contours 図を見るかぎり大差ないものと思える。この TYPE は重複波の形成も小さく、透過域では低周期のときのような低波高帯は存在せず、波浪制御効果は低いと云える。TYPE-B3 は  $T=1.0\text{sec}$ 、 $IL=0.300\text{m}$  の場合であり、TYPE-B1 と類似した波高分布形成を示している。TYPE-B1 に比べると重複波の形成範囲は広がり、透過域では全体に低い波高となっていることから若干波浪制御効果は高くなっていると云える。

図で示していないが、TYPE-A2 および TYPE-B2 は、同周期の TYPE と比べると  $IL$  が中間の値であるため、計算および実験の波高分布形成を見ると、それぞれ中間的な様子を示しているのが分かる。また、没水深を深くした TYPE-A4 および TYPE-B4 は、同条件で没水深の浅い TYPE と比較すると、双方ともに  $T_{ave}$  の値は 0.3 程度高くなっており、シートによる影響が周囲に及ばず、波浪制御効果が悪くなる。

実験値による Contours 図は全体的に左右対称ではなく、場所的に波高の高い部分、低い部分が混在しているがこれは、造波板から発生する入射波が平面的に一律でなく、シート上での波の分散等によるものと考えられる。

図-9 は、 $T=0.6\text{sec}$  から  $T=1.2\text{sec}$  までの各周期について、シート列間隔を  $IL=0.0\text{m}$  から  $IL=0.45\text{m}$  まで 0.03 ( $0.1 \times BL$ ) 間隔で変化させたときのエネルギー損失を考慮していない場合の図であり、横軸にシート構造物全長

$SL(=2 \times IL + 3 \times BL)$  と波長  $L$  の比 ( $SL/L$ ) を示し、縦軸に波浪制御効果を表す値として  $T_{ave}$  を示した。また、今回行った実験結果およびエネルギー損失を考慮した計算結果を点で示した。図-9 より、 $SL/L=2.0 \sim 2.5$  程度でかなり高い波浪制御効果が期待でき、逆に、 $SL/L=0.8$  および  $1.5$  程度では共振する箇所では透過側において波高は全体的に高くなっている。

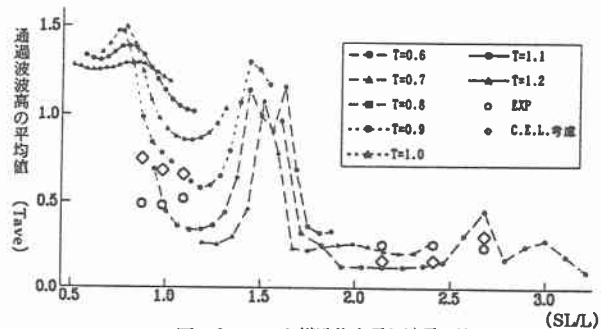


図-9 シート構造物全長と波長の比

## 5. おわりに

結論としては、計算値と実験値の Contours 図は、適当なエネルギー損失を加えることで細部を除きほぼ一致したことから、理論計算値の妥当性が確認されたこと、シート列間隔はシート構造物全長が波長の 2 倍程度となるように設定するのが望ましいことが云える。また、シート長や初期張力などと各水理量の関係が波浪制御効果にどのように影響を及ぼすか調べる必要があり、今後の課題と云える。

## <参考文献>

- (1) 加藤雅也・浜中建一郎・佐藤幸雄 (1993) ; テキスタ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), P. 632~636
- (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 1 2, P.P. 19~24
- (3) 橋本孝治・佐藤幸雄・浜中建一郎 (1997) ; フレキシブルシート周辺の波動場解析と実験 , 海洋開発論文集, Vol 1 3, P.P. 153~158