フレキシブルシート周辺の3次元波動場解析と実験

Analysis and Experiment for 3-D Wave Field around a Flexible Sheet

橋本孝治*・佐藤幸雄**・浜中建一郎***
Koji Hashimoto , Yukio Sato , Ken-ichiro Hamanaka

Several type of structures have been proposed to control the wave field unit now, for example, submerged plate and submerged breakwater. In this study, submerged flexible sheets which are composed of textile sheets in frames with elastic springs are studied for another type. A new method of analysis using the boundary element method with Green function for wave field around the this structure was reported by Sakikawa et al (1996). In this study, a few experiments were carried out to investigate the validity of analyzed results using 3-D wave tank. Compared with calculated results and experimented results, in figures of contours for wave distribution of wave field, it was found that both results agreed good with each other under same hydraulic condition. Consequent by, the validity of the method of analysis was confirmed, by experiments .
Key words ; wave control, flexible sheet, Green function, 3-D experiment

1. はじめに

没水型波浪制御構造物を考えて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構造物のモデルについて、数年前より２次元的に実験および数値解析を行い波浪制御特性を調べて来た。しかし、この種の構造物を実海域に適用させるためには２次元的な検討から３次元的拡張が必要であり、可撓性シートの波浪制御効果が３次元的に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することにした。この場合のグリーン関数を用いて３次元的な取扱いを行った解析方法についてはすでに先川・比奈地・浜中 (1996)、先川・佐藤・浜中 (1996) において詳細に述べられ、計算結果が示されている。また、今回の解析では Energy Loss を考慮し、実験値に近い計算波高を求めた。本研究では解析と同時に３次元平面水槽を使用して実験を行い、上記解析結果との比較検討から解析方法の妥当性を確かめることと、シート周辺の波高分布に対して考察を加えることを行った。

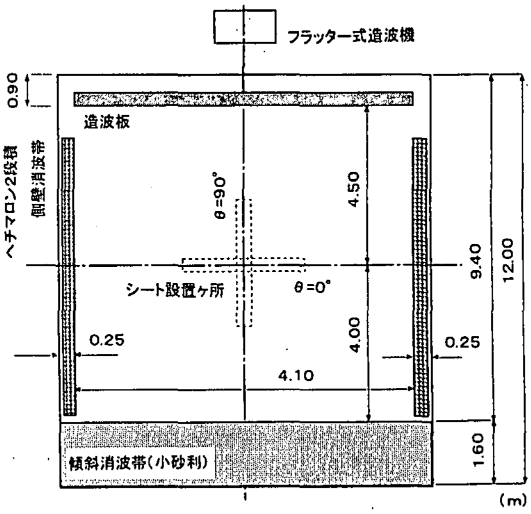
2. 実験装置および実験方法

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 4.6m、長さ 12.0m、深さ 0.70m 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２段積みの消波帯を設けた。使用した実験波は表－１に示すように、周期Ｔと入射波波高H_0の組で、T=0.65sec のときH_0=2.8cm程度とT=1.05sec のときH_0=1.6cmの２組を使用した。水深はh=20cmで一定とした。

つぎに、使用したシートは大きさが正角 BL=0.15m と BL=0.30m の２種類で、図－２(a)、(b)に示すように、BL=0.15m のものは１０枚を連続して並べて使用し、また BL=0.30m のものは５枚を同様の方法で使用した。このときシートに加えた初期張力T_0はシート１枚に付き、BL=0.15m のものはT_0=3kg/m（片側２ヶ使用）、BL=0.30m のものはT_0=13kg/m（片側１４ヶ使用）（図－２(c)）である。この場合の初期張力の選定には２次元の実験および解析結果、３次元の解析結果よりもっとも波浪制御効果が高いと考えられるT_0の値を使用した。シートの没水深d=0.3ｈ（6cm）で一定である。

シートの設置個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をθ=0° とし、BL=0.15m のとき TYPE １、またシート取付け枠を造波板に垂直に設置した場合をθ=90° とし、TYPE ２としている。同様に、BL=0.30mの場合でθ=0° を TYPE ３、BL=0.30m の場合でθ=90° を TYPE ４である。（図－２(b)）

図－２(c)はシートを取付け枠に取付けた場合のシートの拡大図を BL=0.15m および BL=0.30m について示したものである。



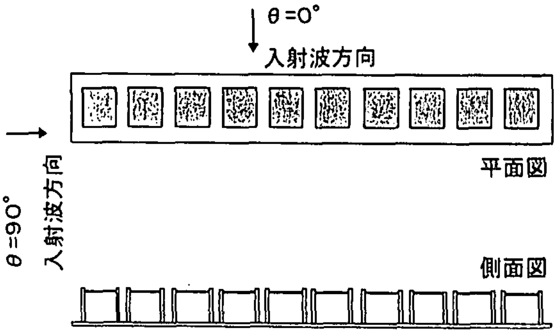
図－１　３次元平面水槽の概略図

＊　学生会員　北見工業大学大学院土木開発工学専攻　（090　北海道北見市公園町）
＊＊　正会員　北見工業大学工学部土木開発工学科
＊＊＊　正会員　北海道東海大学工学部海洋開発工学科

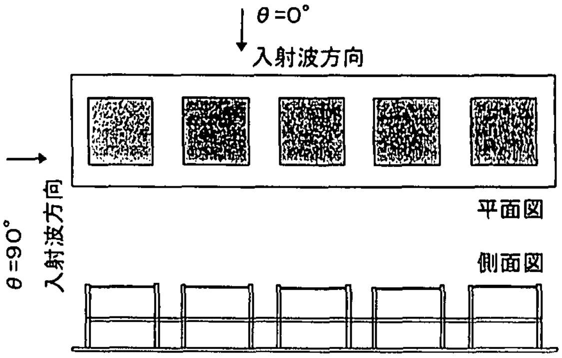
シート構造物まわりの波高測定範囲の規模とシート取付け枠の大きさを対比させるために各TYPEについて図－３(a)、(b)、(c)、(d)に示した。図の測定点を示すメッシュは縦方向に 10 cm間隔で 32 箇、横方向に 17 cm間隔で 21 箇であり波高の測点は計 672 点である。入射波方向は矢印方向の図の上方から下方に進む状態としている。波高の測定はトロッコ上に取付けられた８本の容量式波高計を使用し、１回にメッシュの８点の測点の波高を測定した。この操作をトロッコを移動させながら行うこととした。造波機はトロッコを移動させる都度駆動させるようにした。特に入射波の測定はシート構造物が設置されていない状態でシート設置箇所の沖側範囲についてメッシュ上の波高を測定した。さらに各点の入射波高について入射波の進行方向のメッシュの縦方向ライン上のものを各ラインにそれぞれ平均し 21 本の縦ラインについての平均入射波波高H_0として使用することとした。

表－１　実験の諸元　（水深h＝２０ cm、シート没水深d＝６ cmで一定）

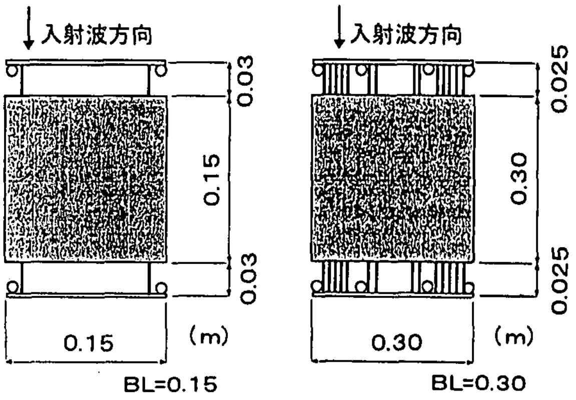
周期 T(sec)	入射波平均波高 H_0(cm)	シート長 BL(cm)	初期張力 T_0(kg/m)	シートの 使用枚数	シートの設置 方向(°)	TYPE
０.６５	２.８	０.１５	３	１０	０	１
			(片側２個)		９０	２
１.０５	１.６	０.３０	１３	５	０	３
			(片側14個)		９０	４



図－２（a）　シート取付状態　　BL=０.１５



図－２（b）　シート取付状態　　BL=０.３０



図－２（c）　シートの拡大図

３．シート周辺の３次元波高分布の解析方法

グリーン関数を使用したシート周りの波動場解析に関した理論の詳細については先川・比奈地・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Energy Loss のモデル化（モデル式）について若干述べることとする。

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, ･･･a_N とする。シートの変位ζ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、以下のようになる。

$$\varsigma_j = a_j \cos\beta x\, e^{-it} \qquad \cdots(1)$$

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

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～a_Nに関しては次式のような関係式が得られる。

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

式（２）中のG_{ij}は３次元グリーン関数で

$$\frac{\partial^2 G_{ij}}{\partial z \partial z_0} = -\frac{k_0^2}{2i_c} \frac{k_0^2 - 1}{h(k_0^2 - 1) + 1} \cdot \sinh k_0(z_0 + h) \cdot \sinh k_0(z + h) \cdot H_0^{(1)}(k_0, r_{ij}) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n^2}{\pi} \frac{k_n^2 - 1}{h(k_n^2 - 1) - 1} \cdot \sin k_n(z_0 + h) \cdot \sin k_n(z + h) K(k_n, r_{ij}) \qquad \cdots(3)$$

である。

ここに、$r_{ij}=\sqrt{(x_j-x_i)^2+(y_j-y_i)^2}$

$H_0^{(1)}$；第１種０次ハンケル関数

K　；第２種変形ベッセル関数

また、$\phi_I(P_i)$はｉ点における入射波ポテンシャルであり、

$$\frac{\partial \phi_I(P_i)}{\partial z_0}=k_0\,e^{i(k_x x-k_y y)}\,\frac{\sinh k_0(z_0+h)}{\cosh k_0 h} \quad \cdots (4)$$

である。式（３）の右辺第２項は減衰定在波の項である。式（２）中の各シートについての積分を

$$\int_{S_j}\cos\beta x\frac{\partial^2 G_{ij}}{\partial z\,\partial z_0}ds=I_{ij} \quad \cdots (5)$$

とおいて、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$r_{ij}\to 0$となるため、３次元グリーン関数の主要解

$$G_{ij}=-\frac{1}{4\pi r_{ij}} \quad \cdots (6)$$

を使用した主値積分となる。以上をまとめると式（２）は特異点がｉ番目ににあるとき

$$\sum_{j=1}^{N}A(i,j)a_j=B(i) \quad \cdots (7)$$

$$B(i)=\frac{\partial \phi_I(P_i)}{\partial z_0} \quad \cdots (8)$$

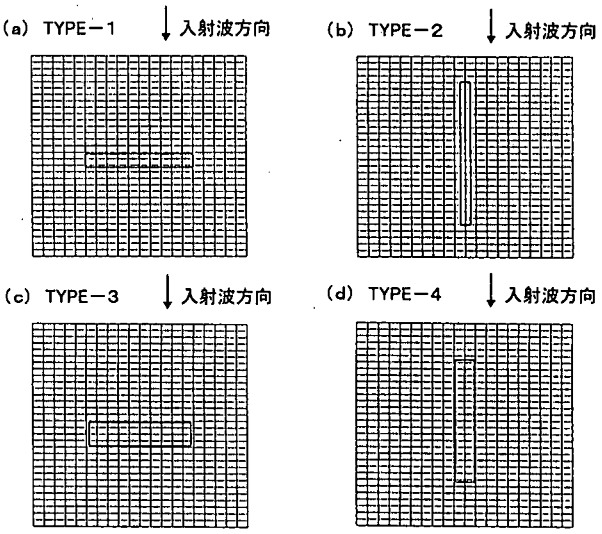
の形となり、式（７）のＮ元連立方程式を解くことにより、各シートの振幅a_1〜a_Nが決定される。

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

$$\phi(P_i)=i_c T_0 \beta^2\sum_{j=1}^{N}a_j\int_{S_j}\cos\beta x\frac{\partial G_{ij}}{\partial z_0}ds+\phi_I(P_i) \quad \cdots (9)$$

であり、式（９）を使用して水面のポテンシャル$\phi(P_i)$を求めるとき、式（９）中の各シートについての積分値を

$\int_{S_j}\cos\beta x\frac{\partial G_{ij}}{\partial z}ds=J_{ij}$　とおいて、



図−３　波高測定範囲図

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、

$$\phi(P_i)=i_c T_0 \beta^2\sum_{j=1}^{N}a_j J_{ij}+\phi_I(P_i) \quad \cdots (10)$$

となり、式（10）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振幅$\eta(P_i)$は

$$\eta(P_i)=|\phi(P_i)| \quad \cdots (11)$$

の形に書くことが出来る。結局、式（11）を使用して計算波高Ｈを求めた。

次に、Energy Lossのモデル化について説明する。

実際のエネルギーロスは、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は、V（流速）とP（圧力）を用い共役複素数を考慮して、

$$W=VP_2-VP_1=-V(P_1-P_2)$$
$$=-iTa^2\beta^2\cos^2\beta x(e^{-i2t}-e^{i2t})$$

$$V=\frac{\partial \varsigma}{\partial t}=-ia\cos\beta x\,e^{-it}$$

$$P_1-P_2=i(\phi_1-\phi_2)e^{-it}$$

となり、１周期では仕事をしないことがわかる。

ここで、仮にVが$\dfrac{\pi}{2}$位相のずれた成分

$$V' = \gamma \cos\beta x e^{-it} \qquad \cdots (12)$$

を持っているものと考え、それによる仕事は、

$$W = V'P_2 - V'P_1 = -V'(P_1 - P_2)$$
$$= \gamma T a \beta^2 \cos^2 \beta x (e^{-2it} + 2 + e^{2it}) \qquad \cdots (13)$$

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する。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（12）のγをモデル化することを考える。

ここでは、先川・佐藤・浜中（1996）と同様

$$\gamma = a\beta^2 TC$$

C： Energy Loss 係数（C.E.L.）

とする。

Energy Loss を考慮した解析は、式（５）のI_{ij}を

I_{ii}に限り

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

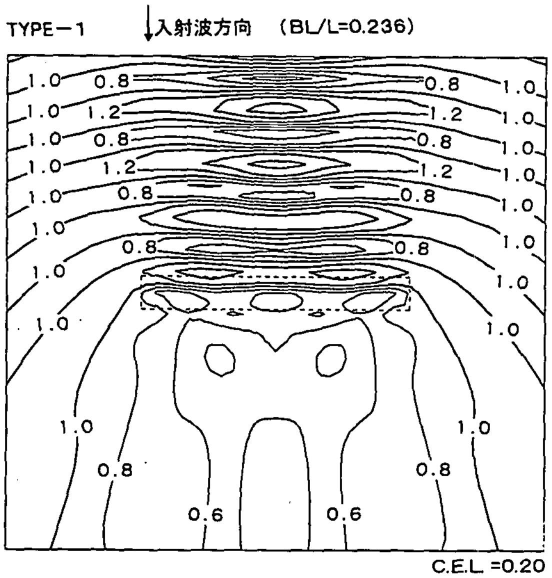
とし、I_{ii}'を用いることで計算できる。

４．理論計算による波高分布

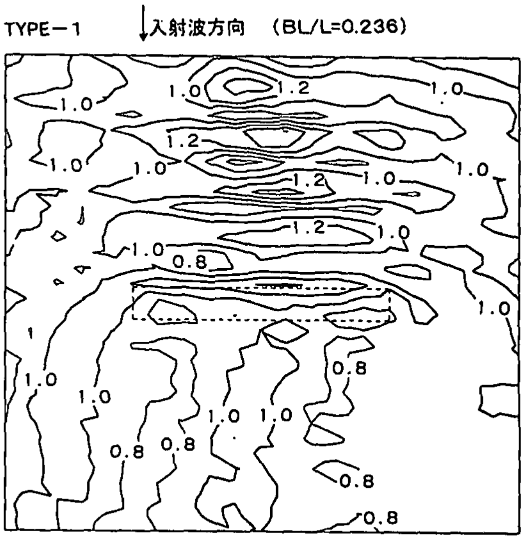
計算条件は実験条件（表－１）と同一条件で行っている。入射波波高H_0を１とした場合のシート周辺の波高分布を Contours 図で示すと、TYPE-1、TYPE-2、TYPE-3 および TYPE-4 に相当する図はそれぞれ図－４(a)、(b)、(c)および(d)のようになる。

計算に用いる Energy Loss 係数（C.E.L.）の決定は、Energy Loss 係数を何度か変えて繰返し計算を行い、実験による波高分布状況と一致するような Energy Loss 係数を用いた。本研究で採用した Energy Loss 係数は、BL=0.15、BL=0.30 ともにθ=0°の場合、0.20 程度で実験値と一致したため C.E.L.=0.20 とし、同様にθ=90°の場合、C.E.L.=0.05 とした。Energy Loss 係数がθ=0°の場合とθ=90°の場合とでこのように値に違いが生じたのは、シート設置方法に大きく関わっていることが原因だと考えられる。

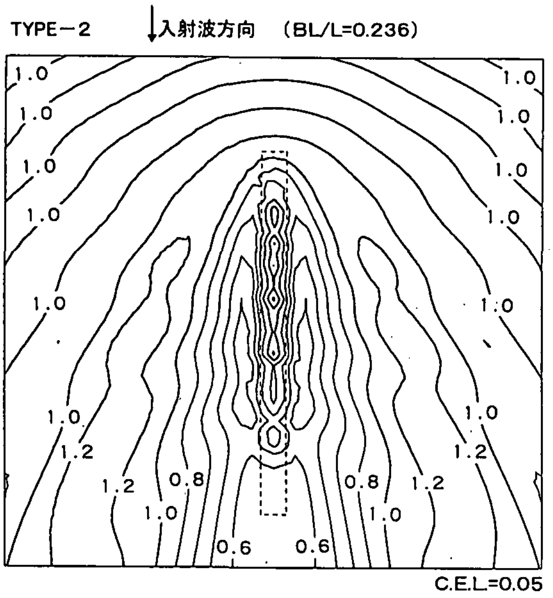
それぞれの図の中央部にある波線で示す矩形部分は実験におけるシート設置位置を示すもので、図－３(a)～(d)に相当する。図－４（a）（TYPE-1 の場合）は入射波の周期Tおよび波長Lがそれぞれ T=0.65sec、L=0.63m でシート長 BL とLとの比は BL/L=0.236 である。図よりシートを横に並べたθ=0°の場合、シート沖側の反射域でやや大きい反射波の発生により重複波の形成が見られる。また反対側のシート岸側の透過域にはシート上で低減した透過率K_T=0.6 程度の低波高域が帯状に広がっているのが見られ、シートによる波浪制御効果が現れていると云える。図－４（b）の TYPE-2 の場合は TYPE-1 と同一条件のシートを縦置きθ=90°のときである。図より入射波に対してシートが狭い分透過域における低波高域は若干狭くなっている。入射波の進行方向に多数のシートを並べたとき、シート末端部の波高の減衰は大きいが、シート末端を過ぎたところでシート枠の両側方から入射波が廻り込むため低波高域がそれ程広くはならないと云える。反射波はシート沖側に少し現れるが TYPE-1 のように広い範囲に重複波が形成されることはない。この事はシート枠の沖側端の反射波が円筒波となって周囲に広がるためと考えられる。また、シート上の波高にかなり高い値があり TYPE-1 や同 TYPE の実験値とは異なる。



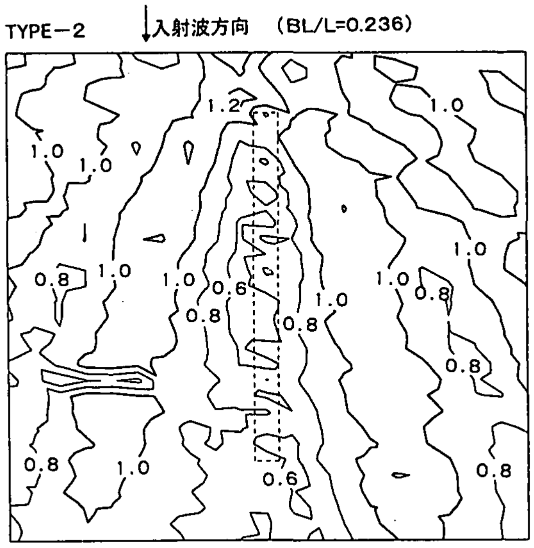
図－４（a） 波高の Contours 図 （計算値）



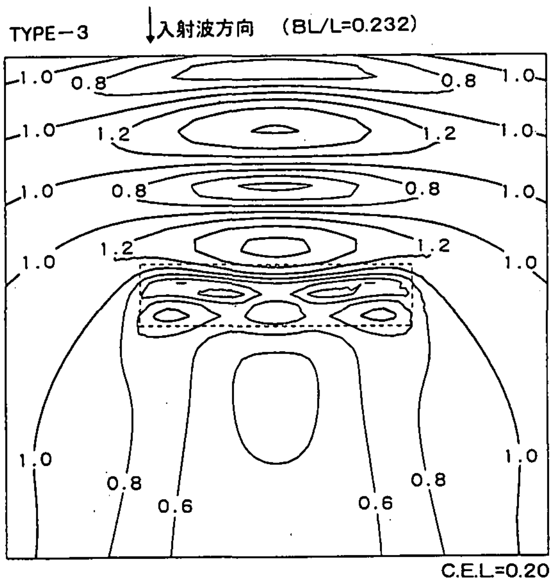
図－５（a） 波高の Contours 図 （実験値）



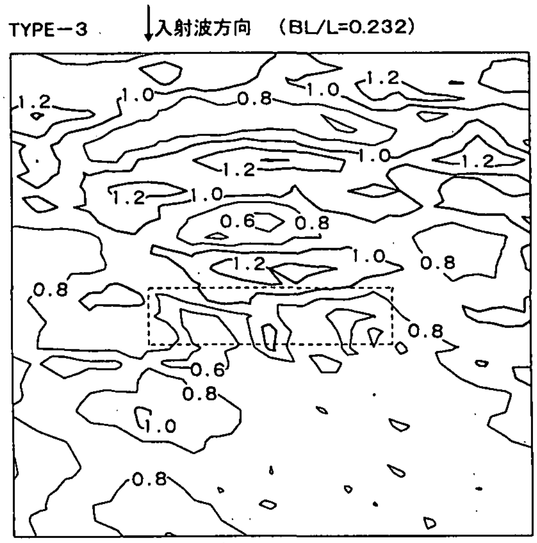
図－4（b） 波高の Contours 図 （計算値）



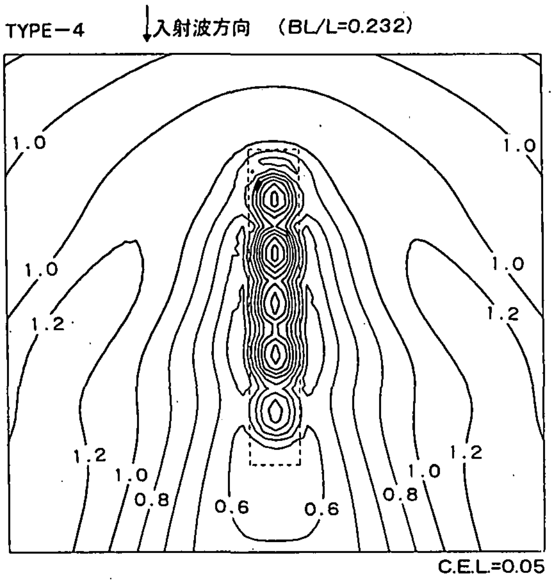
図－5（b） 波高の Contours 図 （実験値）



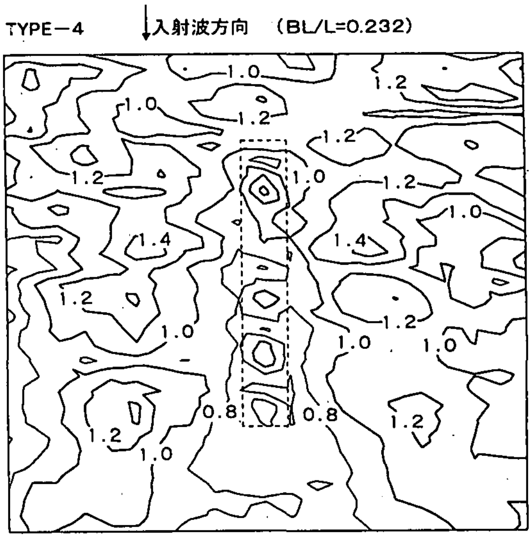
図－4（c） 波高の Contours 図 （計算値）



図－5（c） 波高の Contours 図 （実験値）



図－4（d） 波高の Contours 図 （計算値）



図－5（d） 波高の Contours 図 （実験値）

つぎに、シート BL=0.30m の場合について、同様の Contours 図を示すと図－４（c）（TYPE-3）および図－４（d）（TYPE-4）である。この場合の入射波の周期および波長はそれぞれT=1.05sec、L=1.29mで BL/L=0.232 は TYPE-1,2 と同一条件としている。図－４（c）（TYPE-3）の θ=0° の場合、反射域の重複波の発生範囲はやや広範囲になっていると云える。また同時に透過域においても低波高域がやや広がっているのが見られる。シートを縦置きにした θ=90° の場合についてもシート周辺の波高分布は TYPE-2 と類似しているが透過域における低波高域は TYPE-2 に比してやや広がっているのが見られる。また、 TYPE-2 同様にシート上の波高にかなり高い値がある。以上の事から、初期張力T_0、BL/Lなどを同一条件にした場合、シートの大小にかかわらず、シートの置き方による波高分布の形成がほぼ同様になることが分かったが、強いて言えば、シート長の長い方が若干波浪制御効果が高いと思われる。

5．実験値による波高分布

一方、実験による各測点における測定波高Hを入射波波高H_0で割ったH/H_0の値を Contours 図に描いて示すと、TYPE-1～4 について図－５(a)、(b)、(c)および(d)である。計算値の波高分布と対比させて同一TYPE の図を横に並べ、ほぼ同じスケールで示した。また、計算値による Contours 図同様に図の中央部にある波線で示す矩形部分はシート設置位置を示す。実験による場合は図－５の全 TYPE について計算値に比して Contours 図は左右対称ではなく、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様でないこと、シート上での波の分散等によるものと考えられる。大略的に見ると、TYPE-1 では反射域の重複波の形成、透過域での低波高域の発生等はほぼ計算値と同様の状態となっていると云える。TYPE-2 でも Contour line に乱れはあるがほぼ計算値と類似した結果となっている。シート長が BL=0.30m の場合は TYPE-3、θ=0° のとき透過域にやや広い低波高域が広がっているのが見られ、TYPE-4 ではシート直上においてシートの振幅に同調して重複波が発生しているのが見られる。

6．まとめ

（1） 理論計算による計算値の波高分布 Contours 図と実験値の波高分布 Contours 図との比較よりほぼ一致していることから、理論計算値の妥当性が確認された。

（2） 同一条件の下でのシート周辺の波高分布を比較検討したがシート長 BL=0.30m で大きい方が BL=0.15m の場合に比して透過域における低波高域の範囲が広がり、波浪制御効果は良いと云える。

（3） より実際の現象に近づけるため、Energy Loss のモデル化（モデル式）について検討する必要がある。また、Energy Loss 係数と実際の Energy Loss との関係についても、今後、調べなければならない。

（4） 理論計算と同様な Contours 図を得るために、実験において入射波をさらに一様なものにするための、造波機および造波板の検討が必要と考えられる。

（5） また、初期張力については、同一シートモデルについて再度、２次元的実験により最適初期張力の検討が必要であると考えられ、今後、検討の余地が残されている。

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・比奈地茂之・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，
土木学会北海道支部論文報告集，第５２(B)，P.304～309

３）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，ＰＰ.19～24

４）佐藤幸雄・橋本孝治・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，
土木学会北海道支部論文報告集，第５３(B)，P.98～103