



ホログラフィ理論を基礎にした円柱群配列による海岸波浪制御に関する研究

檀, 和秀

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1993-09-24

(Date of Publication)

2009-03-04

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1755

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3078459>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001755>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

ホログラフィ理論を基礎にした円柱群配列による海岸波浪制御に関する研究

平成 5 年 8 月

檀 和 秀

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 波浪制御	2
1.3 本研究の背景と目的	3
参考文献	5
第2章 消波構造物による波浪制御	7
2.1 緒言	7
2.2 反射率と伝達率（透過率）	8
2.3 透過型鋼管防波堤	13
2.4 結言	19
参考文献	19
第3章 ホログラフィ理論を基礎とした円柱群配列による海岸波浪制御	21
3.1 緒言	21
3.2 インラインホログラフィと波浪制御	22
3.2.1 インラインホログラフィ	22
3.2.2 インラインホログラフィの波浪制御への応用	24
3.3 光の回折理論	26
3.3.1 はじめに	26
3.3.2 光の回折理論（Fresnel-Kirchhoffの回折公式）	26
3.3.3 回折波の離散変換	32
3.3.4 回折積分式誘導の上での仮定	32
3.4 数値計算ホログラフィ（1次元物体に対するインラインホログラフィ）	34
3.4.1 光の回折理論	34
3.4.2 回折波の強度分布	36

3. 4. 3	複素振幅透過率	38
3. 4. 4	数値計算	38
3. 4. 5	物体光	38
3. 4. 6	参照光	39
3. 4. 7	ホログラム	39
3. 4. 8	再生	40
3. 4. 9	波長と周期	41
3. 4. 10	再生例	42
3. 4. 11	波長 λ と物体幅 w 、物体面と観測面との距離 d の関係	45
3. 5	円柱群に対する波の回折理論	46
3. 5. 1	はじめに	46
3. 5. 2	実際の波浪	47
3. 5. 3	材料としての鋼管	47
3. 5. 4	基礎式と境界条件	47
3. 5. 5	円柱1本の場合	50
3. 5. 6	円柱2本の場合	51
3. 5. 7	円柱3本の場合	54
3. 5. 8	直線状に配列された多円柱による波の回折	56
3. 5. 8. 1	入射波	56
3. 5. 8. 2	散乱波	57
3. 5. 9	計算上の注意	59
3. 6	ホログラム型円柱群の配列決定	60
3. 6. 1	ホログラム波高の計算	60
3. 6. 2	ホログラム波高に等価な円柱群への変換	65
3. 6. 2. 1	円柱群の配列	65
3. 6. 2. 2	使用するホログラム波高の幅	67
3. 6. 2. 3	使用円柱径	67
3. 6. 2. 4	配列例	67
3. 6. 3	円柱配列がホログラム波高に等価かどうかの確認	82
3. 7	ホログラフィ型円柱群の波浪制御状況(再生)	101

3. 7. 1	ポテンシャルの重ね合わせから求めた波高分布の精度	101
3. 7. 2	円柱多数本の場合のポテンシャルの重ね合わせ解と厳密解の比較	106
3. 7. 3	ポテンシャルの重ね合わせ解における特殊な操作	119
3. 7. 4	円形島2箇所の場合の再生	119
3. 7. 5	配列粗な円柱の影響の程度	123
3. 7. 6	各種仮定の検討	123
3. 7. 6. 1	インラインホログラフィとの比較	123
3. 7. 6. 2	コヒーレンシー	123
3. 7. 6. 3	振幅透過率	123
3. 8	結言	127
	参考文献	128
第4章	水槽実験	130
4. 1	緒言	130
4. 2	水槽実験	130
4. 2. 1	実験装置	130
4. 2. 2	実験方法	132
4. 2. 2. 1	相似則	132
4. 2. 2. 2	実験方法	132
4. 2. 3	実験結果	133
4. 2. 3. 1	予備実験	133
4. 2. 3. 2	本実験	136
4. 2. 3. 2. 1	構造物直後の波高分布	136
4. 2. 3. 2. 2	波浪制御状況	138
4. 2. 4	考察	141
4. 2. 4. 1	時間的、空間的にコヒーレントかどうか	141
4. 2. 4. 2	インラインホログラフィの物体が半透明であること	141
4. 2. 4. 3	振幅透過率	141
4. 2. 4. 4	波浪制御状況 (再生)	141

4.3	結言	142
	参考文献	143
第5章	画像処理による波高分布計測	144
5.1	緒言	144
5.2	波面での光の屈折	145
5.3	規則波の場合の波高の推定	146
5.4	画像処理	147
5.4.1	回折領域の可視化測定	148
5.4.2	画像処理結果	149
5.5	波浪制御状況の可視化	154
5.6	結言	154
	参考文献	155
第6章	結論	156
	謝辞	159

記号一覧表

a	: 波の振幅、添え字 I、R を付けるとそれぞれ入射波、反射波。円柱列間隔。円柱配列方法。
a_n	: 係数。
a^*	: 振幅、添え字 max、min を付けるとそれぞれ腹、節。
A	: 係数。振幅。円柱配列方法。
$A(z,t)$: 波動。
b	: 円柱間スリット間隔。円柱配列方法。
B	: 係数。長さ、添え字数字は各数字円柱間の長さ。円柱配列方法。
C	: 流量係数。係数、添え字 D、M はそれぞれ抗力係数、質量係数。
d	: 距離。
D	: 円柱直径。添え字は添え字数字の円柱直径。最大輝度と最小輝度の差。
$E(x,y,z,t)$: 波動、添え字 O、R はそれぞれ物体光、参照光。
g	: 重力加速度。
h	: 水深。
H	: 波高、添え字 I、R、T、1/3、max を付けるとそれぞれ入射波、反射波、透過波、有義波、最大波。円柱配列密度が高いこと。
$H_n^{(2)}(x)$: 第 2 種 Hankel 関数。
$I(x)$ 、 $I(x,y,z)$: 強度。
$J_n(x)$: Bessel 関数。
k	: 波数 ($= 2\pi/L$)。
k_1	: 係数。
K_1	: 距離縮尺。
K_R	: 反射率。
K_t	: 時間縮尺。
K_T	: 透過率。
l	: 距離。添え字 m、p はそれぞれ模型、原型。

L	: 波長。円柱配列密度が低いこと。
$m a x$: ホログラム波高の最大値。
$m i n$: ホログラム波高の最小値。
n	: 屈折率。
N	: 平均輝度より明るい点の数。
P_i	: 配列円柱間の中心間距離。
P	: 波のパワー、添え字 I、T を付けるとそれぞれ入射波、透過波。
$P_{i,j}$: 円柱 i と円柱 j の中心間距離。
P_{min}	: 配列された円柱群の中で最小の円柱中心間距離。
r_i	: 円柱 i を中心とする極座標の半径成分。
s	: 距離。
t	: 時間。
$t(x,y,z)$: 複素振幅透過率。
T	: 周期。
$U(x,y,z)$ 、 $U(P)$: 波動の空間依存部分。
V	: 流速、添え字 I、R、T を付けるとそれぞれ入射波、反射波、透過波。
$V(x,y,z,t)$: 波動。
w	: 物体幅。
x	: x 座標。
y	: y 座標。
z	: z 座標。
α	: エネルギー補正係数。円柱配列方法。
α_n	: 係数。
$\alpha_{j,n}$: 係数。
σ	: 角周波数 ($2\pi/T$)。標準偏差。
β	: 位相。円柱配列方法。
$\beta_{j,n}$: 係数。
ϵ	: 係数。
η	: 波形、添え字 I、R、T を付けるとそれぞれ入射波、反射波、透過

波。

θ : 角度。添え字 i 、 $r l$ 、 $r r$ はそれぞれ入射、反射、屈折。

θ_p : 円柱 p を中心とする極座標の偏角成分。

λ : 波長。

ϕ : 位相、添え字 r 、 o はそれぞれ参照光、物体光。

$\phi(x, y)$ 、 $\phi(r, \theta)$: 速度ポテンシャル。

$\phi_p(j, m)$: 散乱波の速度ポテンシャル。

Φ : 速度ポテンシャル。

ω : 角周波数。

第1章 序論

1.1 はじめに

港湾は外海の波浪に対して船舶が安全に碇泊できる水面を有する必要がある、そのために種々の波浪制御構造物が考案されてきた。従来の波浪制御構造物は防波堤に代表されるように波浪制御領域を囲むように設置され、囲まれた領域内の波高を全体に低減させる目的でつくられていた。一方船舶の出入りのため港口を設ける必要がある、その港口からは回折波の影響が発生する。

またこれらの防波堤は従来不透過型が多かった。したがって湾内が静穏になるかわりに反射波の影響で堤体前面では波面が乱れ、波高が高くなったりすることがある。また堤体に働く波力を小さくしたり、堤体前面での乱れを抑えたりするために、異形コンクリートブロックで堤体を被覆して堤体断面を経済的に設計する工夫がなされたりしている。また不透過型であるため閉鎖性の湾内では水質の悪化が問題になり水質改善が望まれている。この解決策のひとつは海水交換が可能な防波堤である。海水交換が可能な構造物には捨石堤、消波ブロック堤、空気防波堤、浮防波堤、カーテンウォール型防波堤、直立両面多孔壁型防波堤などが考えられる。これらの透過型防波堤は波のエネルギーの透過をある程度許す考え方であり、不透過型防波堤と同じく構造物で囲まれた領域内の波高を全体に低く抑えようとするものであった。

従来の不透過型防波堤では港口だけが唯一の海水交換可能な場所であった。これに対してもし構造物で囲まれていないような防波堤が考えられれば、船舶の出入りはしやすく、また海水交換が可能であるという長所が生まれる。本論では波浪制御したい領域をすべて構造物で囲むということをせずに、ある程度離れた場所に構造物を設置することで、希望する領域内の波高を低減させるような波浪制御手法の開発をめざしている。

1.2で述べるように波浪制御手法を波浪制御機構で分類するとエネルギー減勢によるものと位相干渉効果を利用するものとに分けられる。本論で展開しようとする波浪制御手法はエネルギー減勢を利用していない。透過型に属する本論の波浪制御手法は、スリット間隔が小さくなればそのスリット間での渦によるエネルギー損失が大きく関係してくるものと思われるので、第2章ではエネルギー減勢を利用する鉛直鋼管杭を用いた波浪制御手

法についても述べる。

ホログラフィ理論を波浪制御に応用した例は篁・檀¹⁾が発表した以外著者が知る限りでは見当たらない。計算機ホログラフィ^{2)、3)}は物理的に実在しない3次元物体を表示する技術である。ホログラフィがコヒーレントな光を要求するのに対し、計算機上ではこの条件を簡単に満足させられるので計算機ホログラフィはホログラムを作る上で便利な面がある。ホログラムを計算機上で作ることができれば、海岸構造物設計にホログラフィを応用する上で計算機ホログラフィは有効な手段となろう。1. 3ではホログラフィを波浪制御に応用するに至った背景と目的についても述べる。

1. 2 波浪制御

消波機構としては

- 1) 構造物内部、表面の摩擦
- 2) 砕波や越波などに伴う大規模な乱れ
- 3) 断面の急拡縮に伴う損失
- 4) 波の分解と重ね合わせによるもの

などがあり⁴⁾、これらのいずれか或いは組み合わせで波のエネルギーを減じさせ波浪制御する。人工的に広天端幅潜堤上で砕波をおこさせエネルギーを減じさせようとするものもある。最近では没水平板（三日月形）などにより波浪エネルギーを1箇所を集めて発電させ電気エネルギーに変換し波のエネルギーを吸収しようとするものがある。消波発電、波力発電と呼ばれるものがそれである⁵⁾。

本論に関係する鋼管杭型の消波構造物について述べる。Costello⁶⁾が1952年に円柱杭を多数一様に並べた消波構造物に対して模型実験を実施している。透過率が入射波の波形勾配に影響されること（波形勾配が0.05以下では透過率が0.7~1.0程度、波形勾配が0.05~0.2の範囲では透過率が0.4~0.9程度であったこと）や、層列数を2倍にしても18%程度しか透過率が小さくならなかったことなどをあげて、Wiegell⁷⁾は1961年円柱群による消波構造物は円柱間隔が非常に小さい場合を除いて防波堤としてはあまり役に立たないと発表している。林等⁸⁾は1965年から1968年にかけて一連の研究を実施し、円柱直径に対する円柱純間隔の比が0.1程度であれば水理的に

効果があり望ましいと結論している。この場合上記消波機構の3)のエネルギー損失を考慮して結論付けている。したがって比較的狭いスリット間隔でなければならないとされる。角野等⁹⁾は漸近展開接合法により多列柱体列(円柱)に対する境界値問題として解き反射率、透過率を求めている。

一方波の位相干渉効果に関してはDaviesとHeathershaw¹⁰⁾は1980年から1984年にかけて砂れんの成長に関連して水面波と海底地形の相互作用に関する研究を理論的に取り扱い実測値と比較している。この一連の研究の中では海底地形を正弦波であるとし、水面波の波数(k)と海底地形の波数(l)の比 $2k/l$ が変化すると反射率は振動すること、また $2k/l=1$ の時に反射率が最大になること(以下波数比条件という)を理論と実験で示している。 $2k/l$ の範囲は0.5~2.5である。さらに海底地形のripple数とrippleの波形勾配が与えられると反射率はrippleの振幅が大きくなるにつれ、水深が浅くなるにつれ増大することを示している。反射率が大きくなることは、第2章でも述べるが透過率が小さくなることにつながる。このことから海底地形との位相干渉効果を利用して波浪制御できないかと考えられる。

これによく似たものとして複数列潜堤が考えられる。潜堤を近似的にrippleと考えればよい。青木・樫木¹¹⁾は複数列潜堤による波浪制御について研究している。この研究の中で青木・樫木は複数列に設置する潜堤の純間隔と水面波の波長の比に対して反射率は0~0.8程度の範囲で、透過率は0.6~1.0程度の範囲で振動することを示しており、実験値はほぼこれらの範囲に近くなっている。潜堤上水深が充分であれば碎波限界付近までの波については位相干渉効果も期待できると結論している。

海底地形の波数と水面波の波数との波数比条件を満足しなければ反射率が大きくなり、結果として透過率が小さくならない。自然の来襲波浪は周期も一定でなく、波長も一定でないから、海底地形の波長を波数比条件を満足するように時々刻々変えねばならない。周期、波長が変化しても波浪制御効果に変わりがない手法が望まれる。

1.3 本研究の背景と目的

ホログラフィは形成された干渉縞が回折格子の役割をして元の波面を再生する原理を応用している。回折格子が厚みまたは屈折率の変化を持って干渉縞の作用をする、つまり位

相変調されるのが位相ホログラムと呼ばれ、回折格子が振幅透過率を与えるものが振幅ホログラムである。したがって波浪制御の消波機構の項で述べた単なる波の重ね合わせや分解を応用している訳ではなく、全く別のホログラフィという原理を応用していく。

筧等^{12), 13)}はホログラフィによる3次元流速測定法を開発している。筧はこの間ホログラフィを応用した波浪制御手法の着想に至った。ホログラフィは物体を3次元的に記録・再生する技術であり、3次元的に物体を再生する際、もともと物体内は波が無く再生された物体に相当する領域は波立っていない静穏な領域であろうと考えられる。物体の表面からは物体を再生する波が出ているが、物体内部はその内部を見る情報を持っていないので暗く再生されると考えられる。暗いということは物体の情報(波)が少ないということであり、波が少ないということは静穏に近いということになる。ホログラフィの再生時には物体を再生する波とそれ以外の波が発生する。もし物体を再生する波だけであれば再生された物体内は静穏であろうと考えられるが、物体を再生する波以外の波が存在するため再生物体内はその分だけ波立ちがあると考えられる。ただ物体再生波により物体内部を暗いと再生する分だけ、波を低く抑えられるので周りに比べて静穏な領域が再生されるといえる。ホログラムが物体光と参照光の干渉縞を記録したものであり、再生波に対して複素振幅透過率を呈することを考えると、波浪制御の場合のホログラムの役割をするのが透過型構造物であり、来襲波浪に対して透過率を呈するのではないかと考えた。またすでに述べた通りホログラムには振幅ホログラムと位相ホログラムがあり、単列透過型構造物は振幅ホログラムに、複列透過型構造物は位相ホログラムにそれぞれ相当するであろうと考え、透過型構造物のスリット間隔や列数によって波浪制御効果をコントロールできると考えた。

ホログラフィにおいては物体は任意の形状でもよく、その物体をあるがままの状態で再生できるという利点がある。この理論を応用するのであるから波浪制御領域としては任意の形状が選べ、しかも選んだ領域をもとのままに波浪制御できるという点で逆解析可能な手法であると言える。

本研究の目的は以下のように従来の波浪制御手法では適さないような場合にも可能な波浪制御手法を開発することである。従来の波浪制御構造物は波浪制御領域を囲むように設置されていた。従来の方法と本手法の大きく異なる点は波浪制御構造物と波浪制御領域が離れていても制御できるということである。具体的にはホログラフィ理論を応用して波浪制御能力を有するスリット型波浪制御構造物を決定するための手法を開発することである。

以下のような場合に本手法が有効となろう。

- 1) 従来の構造物が波浪制御領域を囲むように設置されていたから船舶の出入りが非常に不自由となる場合。本手法は波浪制御領域を囲む構造物がないため船舶は自由に出入りできる。避難港やのりなどの養殖漁場の確保に適する。
- 2) 占有面積が小さくなくてはいけない場合。比較的水深の浅い領域を波浪制御領域として選ぶことができ、構造物の占有面積が小さいので海域内の候補地としてはいくらかでもあげられる。
- 3) 波浪制御領域と波浪制御構造物との間に大きな距離が必要となる場合。
- 4) 不透過構造物が適さない場合。透過構造物として設置する。
 - イ) 不透過型であるために船舶の出入りが不自由となる場合。
 - ロ) 強大な波力を受ける砕波帯内や地形的に波が集中する地点では不透過構造では堤体幅員や天端高が非常に大きくなり、不経済となる場合。
 - ハ) 不透過構造物であるがために海浜地形の変化が心配される場合。
- ニ) 占有面積が小さくなくてはいけない場合。
 - ホ) 反射エネルギーが小さくなくてはいけない場合。
 - ト) 閉鎖性湾内のように水質改善が望まれる場合。
- 5) 杭構造物であるから軟弱な地盤にも設置可能である。

参考文献

1. K. Dan and M. Yano: Study of Holography Applied to the Piles Structure for Wave Damping in Sea Shore, Proceedings of the Sixth International Symposium on Flow Visualization, pp.363-367, 1992.
2. 大越孝敬: ホログラフィ, pp.187-212, (社)電子通信学会, 1977.
3. L. P. Yaroslavskii and N. S. Merzlyakov (Translated by Dave Parsons): Methods of Digital Holography, Consultants Bureau, pp.1-18, 1980.
4. 近藤徹郎・竹田英章: 消波構造物, pp.3-10, 森北出版(株), 1983.
5. 工藤君明: 北の海にサンゴ礁を, 土木学会誌1990年4月号, pp.6-8, 1990.

6. R. D. Costello: Damping of Water Waves by Vertical Circular Cylinders, Transactions, American Geophysical Union, Vol.33, No.4, pp.513-519, 1952.
7. R. L. Wiegel: Closely Spaced Piles as a Breakwater, Dock and Harbour Authority, September, p.150, 1961.
8. 林泰造・狩野徳太郎・白井増次郎・服部昌太郎: 筒型透過性防波堤の水理特性について, 第12回海岸工学講演会講演集, pp.193-197, 1965.
9. 角野昇八・小田一紀: 任意断面柱体列による波の反射率および透過率の境界値問題解析, 土木学会論文集, 第369号/II-5, 1986.
10. A. G. Davies and A. D. Heathershaw: Surface-wave propagation over sinusoidally varying topography, J. Fluid Mech., vol.144, pp.419-443, 1984.
11. 青木伸一・樫木亨: 複列潜堤の波浪制御効果について, 土木学会第39回年次講演会, pp.313-314, 1984.
12. 篁源亮・井口理一郎・木佐幸佳: ホログラフィ干渉法による流速測定, 土木学会論文集, No.255, pp.75-80, 1976.
13. 篁源亮・藤田一郎: ホログラフィによる流速三方向成分の測定, 土木学会論文集, No.276, pp.45-52, 1978.

第2章 消波構造物による波浪制御

2-1 緒言

消波とは波高を制御することであり、波浪制御とは波高、方向、周期を制御することをいう。波のエネルギー分散、集中と関連して方向を制御することが単位幅あたりのエネルギーを減少させることにつながり、結果として波高を変化させることにもなる。このことから波高と方向は同時に制御されることが多い。

まず波高と方向を制御するには以下の現象を利用する。波には浅水変形といって水深が変化することにより波高が変化する現象がある。屈折と回折は波高と方向を変化させる。反射は方向を、伝達は波高をそれぞれ変化させる。波の方向分散は波高と方向を変化させ、波の速度分散は波高を変化させる。波のエネルギーを失った結果波高が変化する場合として、海底摩擦、砕波、逆風による抵抗、内部粘性などがある。

周期制御に関しては望月等^{1), 2), 3)}の研究がある。波浪フィルター用水路と呼ばれる幅の狭い方形の水路と幅の広い方形の水路とを交互に組み合わせた水路を使うと、特定の周波数以下の波は通過できるが、その他の波は通過できない。このことを電磁波の周波数フィルターの原理を応用して実験的に確かめている。他に潜堤を利用して強制的に砕波させ高周波の波を発生させるやりかたがある。

人類は古くからこうした現象を巧みに利用して、海岸に港を構築し、防波堤を築造して荒波の猛威から港を守った。

波がこのような構造物や海底地形が急変する場所に到達すると、波のエネルギーの一部が反射され、一部が透過し、残りのエネルギーが砕波や粘性、摩擦などによって消耗される。単位幅あたりのエネルギー保存の考えから

$$1 = K_R^2 + K_T^2 + K_{Loss} \quad (2-1)$$

ここに反射率： $K_R = \frac{H_R}{H_I}$ 、透過率： $K_T = \frac{H_T}{H_I}$ 、エネルギー損失率： K_{Loss} である。

構造物による鉛直方向や水平方向への2次元的な波の変形問題は、こうした波の反射、

透過、損失に分類して各項の大小を考察することで考えられる。

2. 2では反射率、透過率を求める手法について述べる。2. 3では本論に関係する1. 2で概観した鋼管杭型の防波堤について、具体的な杭直径や配列をあげ、その他の研究も交えて述べる。

2. 2 反射率と伝達率 (透過率)

規則波の反射率の計算には、一般にHealyの方法、フーリエ解析の方法等が用いられている。フーリエ解析の方法によれば波高計設置間隔に注意すれば精度よく推定できると報告されている⁴⁾。またこの方法は不規則波にも適用できる特徴がある。反射率、透過率、エネルギー損失で消波構造物の消波性能を判断することができることは述べた。まず反射率の計算法について述べる。

2. 2. 1 Healyの方法

x の負の方向に進む入射波の振幅を $a_I (=H_I/2)$ 、正の方向に進む反射波の振幅を $a_R (=H_R/2)$ とし、かつ $a_I > a_R$ とすると、これらの合成波の波形は次のようになる。

$$\begin{aligned} \eta &= a_I \cos(kx + \sigma t) + a_R \cos(kx - \sigma t) \\ &= (a_I + a_R) \cos kx \cos \sigma t - (a_I - a_R) \sin kx \sin \sigma t \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\sigma t + \beta) \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし、} \cos \beta &= \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad \sin \beta = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \\ A &= (a_I + a_R) \cos kx, \quad B = (a_I - a_R) \sin kx \\ A^2 + B^2 &= a_I^2 + a_R^2 + 2a_I a_R (2kx) \end{aligned} \right\} (2-3)$$

合成波の振幅は x の関数であり、 $\cos(2kx)$ は-1から1まで変化する。したがって振幅は最大 $(a_I + a_R)$ から最小 $(a_I - a_R)$ まで変化する。これから $L/4$ ごとに腹と節が現れ、腹での振幅を a_{max}^* 、節での振幅を a_{min}^* とすると、これらは

$$a_{\max}^* = a_I + a_R \quad (2-4)$$

$$a_{\min}^* = a_I - a_R \quad (2-5)$$

で与えられる。よつて

$$a_I = \frac{1}{2}(a_{\max}^* + a_{\min}^*) \quad (2-6)$$

$$a_R = \frac{1}{2}(a_{\max}^* - a_{\min}^*) \quad (2-7)$$

を得る。これから反射率 K_R は

$$K_R = \frac{a_R}{a_I} = \frac{a_{\max}^* - a_{\min}^*}{a_{\max}^* + a_{\min}^*} \quad (2-8)$$

腹での振幅（あるいは波高）と節での振幅（あるいは波高）を測定することによつて反射率を求めることができる。

2. 2. 2 フーリエ解析の方法⁴⁾

入射波 η_I と反射波 η_R を式

(2-9)、(2-10) とし合成波が

(2-9) と (2-10) の重ね合わせ

で表現できると仮定する。図-2

1のように波高計ピックアップ1 (PU1) の点 X_1 と $\Delta x (= 121 \text{ cm})$ だけ離れた地点 $X_2 (= X_1 + \Delta x)$ に波高計ピックアップ2 (PU2) を設置する。PU1 と PU2 におけるそれぞれの合成波 η_1 と η_2 は式 (2-11, 12) のようになる。

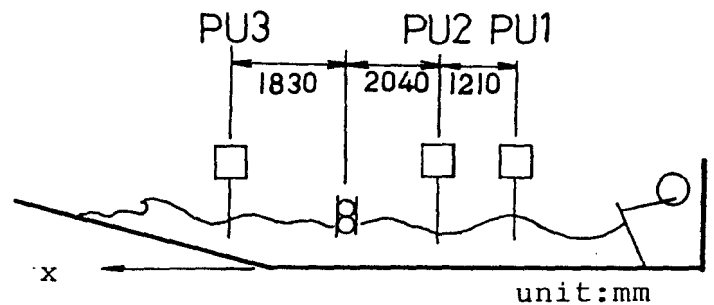


図-2. 1 波高計位置

$$\eta_I = \frac{1}{2} H_I \cos(kX - \sigma t + \theta_I) \quad (2-9)$$

$$\eta_R = \frac{1}{2} H_R \cos(kX - \sigma t + \theta_R) \quad (2-10)$$

$$\eta_1 = (\eta_I + \eta_R) \Big|_{x=\lambda_1} = A_1 \cos(\sigma t) + B_1 \sin(\sigma t) \quad (2-11)$$

$$\eta_2 = (\eta_I + \eta_R) \Big|_{x=\lambda_2} = A_2 \cos(\sigma t) + B_2 \sin(\sigma t) \quad (2-12)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2} H_I \cos(kX_1 + \theta_I) + \frac{1}{2} H_R \cos(kX_1 + \theta_R) \\ B_1 &= \frac{1}{2} H_I \sin(kX_1 + \theta_I) - \frac{1}{2} H_R \sin(kX_1 + \theta_R) \\ A_2 &= \frac{1}{2} H_I \cos(k\Delta X + \theta_I) + \frac{1}{2} H_R \cos(k\Delta X + \theta_R) \\ B_2 &= \frac{1}{2} H_I \sin(k\Delta X + \theta_I) - \frac{1}{2} H_R \sin(k\Delta X + \theta_R) \end{aligned} \right\} (2-13)$$

ここで、 H_I : 入射波高、 H_R : 反射波高、 $k = \frac{2\pi}{L}$ 、 L : 波長、 $\sigma = \frac{2\pi}{T}$ 、 T : 周期、 θ

: 位相、 x : 水平距離、添え字 I と R はそれぞれ入射波と反射波に関する量である。

式 (2-13) より、 H_I と H_R は次式で与えられる。

$$H_I = \frac{1}{|\sin(k\Delta X)|} \sqrt{(A_2 - A_1 \cos(k\Delta X) - B_1 \sin(k\Delta X))^2 + (B_2 + A_1 \sin(k\Delta X) - B_1 \cos(k\Delta X))^2} \quad (2-14)$$

$$H_R = \frac{1}{|\sin(k\Delta X)|} \sqrt{(A_2 - A_1 \cos(k\Delta X) + B_1 \sin(k\Delta X))^2 + (B_2 - A_1 \sin(k\Delta X) - B_1 \cos(k\Delta X))^2} \quad (2-15)$$

ただし、 $\sigma^2 = gk \tanh kh$ の関係が成立するとする。

実測した水位記録を次のようにフーリエ解析し、 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 を求めれば式 (2-14、15) より入射波高 H_I と反射波高 H_R が算出できる。

$$A_1 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \eta_1 \cos \sigma t dt = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^m \eta_{1i} \cos \sigma \left(-\frac{T}{2} + i \Delta t \right) \Delta t$$

$$B_1 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \eta_1 \sin \sigma t dt = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^m \eta_{1i} \sin \sigma \left(-\frac{T}{2} + i \Delta t \right) \Delta t$$

$$A_2 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \eta_2 \cos \sigma t dt = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^m \eta_{2i} \cos \sigma \left(-\frac{T}{2} + i \Delta t \right) \Delta t$$

$$B_2 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \eta_2 \sin \sigma t dt = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^m \eta_{2i} \sin \sigma \left(-\frac{T}{2} + i \Delta t \right) \Delta t$$

(2-16)

反射率は $K_R = \frac{H_R}{H_I}$ で求められる。

2. 2. 3 フーリエ解析で求めた反射率について^{5), 6)}

回転ドラム型消波発電装置を設置した場合に反射率をフーリエ解析で求めた。実験水槽は高さ1 m、幅1 m、長さ25 mの造波水槽であり、水底単ヒンジのフラップ型波起こし装置がついている。

任意の2点で得られた波形記録を式 (2-16) でフーリエ解析するとき、1周期あたりの

時間軸の分割数は図-2.2をみればわかるように20以上で得られる反射率はほぼ安定する。

周期は1.5 sec、2.0 sec、3.0 sec程度の3周期について実施した。周期の小さいほど第1波から9波までの周期のばらつきが大きく、得られた反射率にもばらつきが大きい。周期の大きい場合(3.0 sec)には得られた反射率のばらつきも比較的小さく、標準偏差も0.03程度と周期の小さい場合(1.5 sec)の標準偏差が0.1程度に比べて小さい。このことから本造波水槽を規則波実験に使う場合は周期は最小約3秒程度とすべきであることが理解される。

以上のことから注意すべきは、実験装置の性能がフーリエ解析手法を適用する際の各種の仮定を満足しているかどうかを確認することである。実験条件が仮定に合っていないければ反射率を決定することは困難である。さらに得られた波形記録を離散化する場合の離散化数は1周期あたり少なくとも20は必要である。

2.2.4 透過率について

前節の手法によって入射波を分離することによって、入射波高 H_I がわかる。透過波高を決めるには、適当な場所において透過波高を実測し透過波高 H_T を決定して透過率 K_T を求めることになる。

ただし規則波としての透過波高を簡単に決定できない場合もある。この原因には装置の性能とも関連し慎重に決定すべきである。

2.2.5 不規則波の反射と伝達

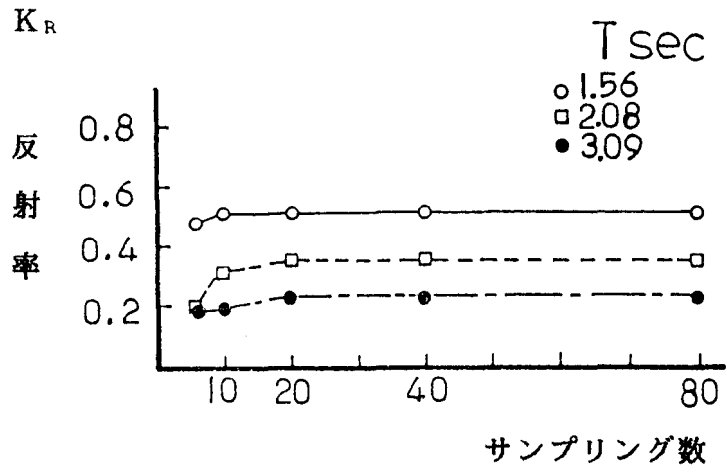


図-2.2 サンプル数と反射率

不規則波を波高、周期、位相の異なる正弦波の重ね合わせで表されると考える。不規則波の反射率と伝達率はつぎのように二通りの表し方がある。

1) 不規則波を構成する個々の成分波について、周波数 f の関数として反射率 $K_R(f)$ 、伝達率 $K_T(f)$ を求める。

2) 不規則波全体を代表する K_R 、 K_T を求める。

1) の方法で実験や現地観測から反射率 $K_R(f)$ を求めるには 2-2-2 で述べた二点で計測した波形記録をフーリエ解析して、各成分波について A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 を計算して入射波高 $H_I(f)$ 、反射波高 $H_R(f)$ を求め次式で $K_R(f)$ を計算する。

$$K_R(f) = \frac{H_R(f)}{H_I(f)} \quad (2-17)$$

2) の方法は次式で K_R 、 K_T を求める。

$$K_R = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} S_R(f) df}{\int_0^{\infty} S_I(f) df}} \quad (2-18)$$

$$K_T = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} S_T(f) df}{\int_0^{\infty} S_I(f) df}} \quad (2-19)$$

ここで、 $S(f)$ は周波数スペクトルである。添え字 I、R、T はそれぞれ入射、反射、伝達波に関するものを表す。 $S_I(f)$ と $S_R(f)$ は 1) で求めた $H_I(f)$ 、 $H_R(f)$ から算出し、 $S_T(f)$ は $H_T(f)$ から求める。

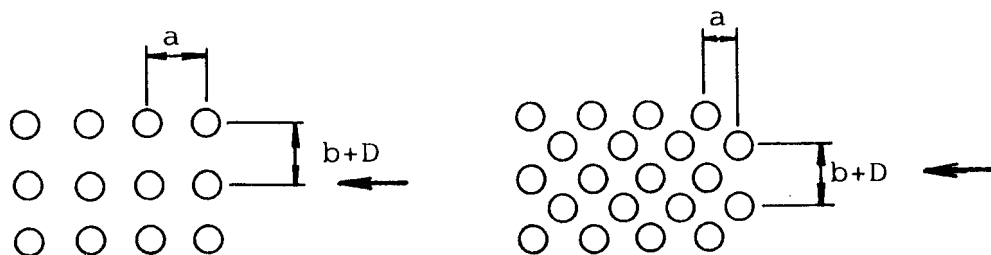
2.3 透過型鋼管防波堤

鋼管防波堤にも透過型、不透過型がある。透過型の鋼管防波堤にも鋼管を水平に使用する場合^{7)、8)}と鉛直に使用する場合がある。他に鉛直鋼管と水平鋼管を格子状に組み立てた構造もある。本節では本論に關係する鉛直に配列した透過型鋼管防波堤について述べる。

2.3.1 透過性鋼管防波堤

鋼管杭を使用した透過型防波堤による波の減衰効果については第1章で述べたようにCostello、Wiegel、林等、角野等、浦島・近藤、笥・檀が報告している。以下にこれらの流れを概観する。

Costello⁹⁾は単列、複数列、千鳥配列複数列の鉛直円柱杭群に対して実験的に考察している。直径0.95cmの円柱を用いて表-2.1(図-2.3参照)のような5種類の



(a) Type I, II, III, IV

(b) Type V

図-2.3 円柱杭配列

表-2.1 Costelloの実験例

単位: inch

Type	I		II		III		IV		V	
D	3/8		3/8		3/8		3/8		3/8	
b + D	1		1		2		2		2	
a	1		2		2		1		1	
列数	24	48	24	48	24	48	24	48	24	48

配列に対して抵抗線式波高計を用いて透過率を実測している。水槽は幅0.305m、高

さ0.914m、長さ18.288m、一様水深hは0.457mである。岸側ではレキを積み重ねた消波装置を用いている。Costelloは透過率は入射波の波形勾配(H/L)、相対水深(h/L)、配列形状のパラメーターとして(円柱列長さ/円柱列間隔)、装置に関するパラメーターとして(円柱間隔/水槽幅)の4つで表されると考えた。1.2で述べた通り、透過率が入射波の波形勾配に影響されることや、円柱杭の列数を24列から2倍の48列すると18%程度透過率が小さくなったことを示している。

Wiegel¹⁰⁾は単列円柱群の場合、簡単に考えれば図-2.4のように円柱中心間隔(b+D)の幅に入射波のパワーP_Iが入ってくると考え、また円柱間の純粋のスリット間隔(b)の間を透過波のパワーが通過すると考えた。入射波のパワーP_Iと透過波のパワーP_Tの比は各パワーが通過する幅の比であると考え、透過率K_Tは

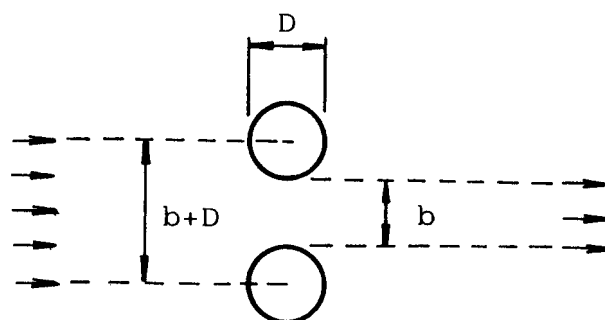


図-2.4 円柱間スリット

$$K_T = \frac{H_T}{H_I} = \sqrt{\frac{P_T}{P_I}} = \sqrt{\frac{b}{b+D}} \quad (2-20)$$

と表現できると考えた。これを図-2.7の中に破線として表している。

これは明らかに単純化したのであって、実際透過波のパワーは幅bの間を一様に通過するわけではない。林等^{11), 12), 13), 14)}は図-2.5のような透過性鋼管防波堤に対し、入射波 η_I 、反射波 η_R 、透過波 η_T とし、オリフィスなどと同様に水が鋼管間隙を通過する際の縮流を考え、微小振幅浅水波理論を適用し、速度に関しては入射波、反射波、透過波それぞれの水深方向への平均流速 V_I 、 V_R 、 V_T を用い、防波堤での速度の連続性、ベルヌーイの定理、流量連続条件を適用して単列円柱群の場合の透過率K_Tを次式のように求めた。

$$K_T = 4 \frac{h}{H_I} \varepsilon \frac{a^2 k h}{\alpha \tanh k h} \left(-\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{H_I}{2h} \frac{\alpha \tanh k h}{a^2 k h}} \right) \quad (2-21)$$

$$K_R = 1 - K_T \quad (2-22)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{Cb}{D+b}}{\sqrt{1 - \left(\frac{b}{D+b}\right)^2}} \quad (2-23)$$

Cは鋼管間隙からの噴出水流の流量係数である。αはエネルギー補正係数。

式(2.21)から得られる透過率を図-2.6に示す。林等の実験結果も示している。この図では円柱径Dに対するスリット間隔bの比(間隙比b/D)は0から1までの範囲で検討されている。ただし実験ケースは0.1から0.2付近を中心に5ケースである。造波水槽の岸側は1/15の勾配斜面にして反射波の影響を小さくしている。林等の結論は透過率、反射率については理論と実験結果は比較的良好一致していると結論されている。円柱杭に生じる曲げモーメントの大きさと透過率の関係は間隙比(b/D)を大きく

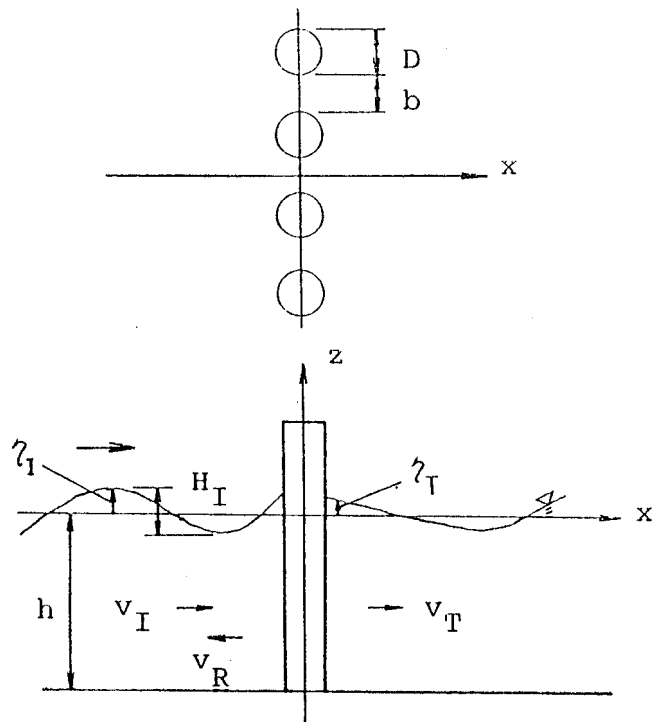


図-2.5 透過性鋼管防波堤

すれば曲げモーメントは小さくなるが透過率が大きくなるというもので、透過率もある程度小さくなりしかも曲げモーメントも比較的小さいといった水理的効果を最も期待し得る間隙比は0.1程度であると結論している。ただ間隙比のケースとしては0.2以上の場合も行うべきであろうし、実験データは何回の平均であるかなどについては記されていない。

萩原¹⁵⁾は長さ40m、幅4m、高さ1.3mの造波水槽を2つに分割し幅0.6mの水

路で実験を実施し理論解と比較している。理論は多円柱列間の速度ポテンシャルを仮定し、

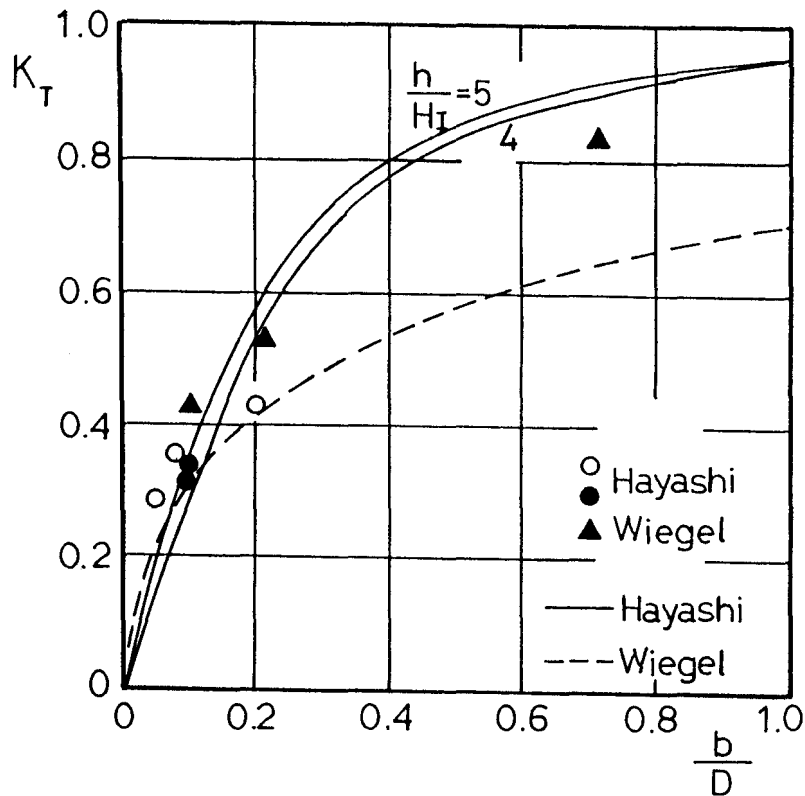


図-2.6 透過率 K_T と鋼管直径 D に対する鋼管間隙 b の比(b/D)の関係

各円柱列付近の流体に対する運動方程式をたてる。この中には抗力係数 C_D と質量係数 C_M が含まれる。問題は抗力係数と質量係数の与え方に帰着されるのだが、単円柱列に対する実験を実施し、抗力係数と質量係数を推定している。以上の連立方程式を解いて反射率、透過率を求めるものである。以下実験条件を記す。一様水深 h は0.5m。周期 T は0.9~2.0までの7種類。波高は2~12cm。入射波の波形勾配は0.01~0.06程度。相対水深 h/L は0.1~0.36。円柱直径 D は3.8cm。間隙比は0.05~0.5までの5種類。3列までの円柱列に対して検討しており、2列目と3列目の間隔 B_{23} は1列目と2列目の間隔 B_{12} に比べて大きくとっており遊水部として考えている。全構造物長さを B ($=B_{12}+B_{23}$)とすると B/L は0.04~0.42の範囲で検討している。遊水部の長さ B_{23} に対する B_{12} の比 B_{12}/B_{23} は0.5、1.0、2.0の3種類である。反射率はHealyの方法で求めている。容量式波高計を使用している。透過率は模型背面から1/4波長離れた地点で安定した5波の波形から求めている。

1) 列数が3の場合の透過率に最も影響を及ぼす要因は波浪条件では波形勾配、構造条

件では間隙比である。相対堤体長さ B/L の影響は小さい。

- 2) 列数が3の場合の反射率、透過率をともに小さくするには、 $B/L = 0.25 \sim 0.3$ 。1列目の間隙比が0.2以上0.5以下。3列目の間隙比が0.1程度。2列目の間隙比は3列目のそれに比べて大きく、かつ1列目のそれに比べて非常に小さくなくてはならない。遊水幅比 B_{12}/B_{23} は0.5~2.0がよい。
- 3) 列数が3の場合と2の場合の反射率、透過率を比較すると列数3の場合は2の場合に比べて入射波の周期に対する反射率、透過率の変化が小さく、反射率、透過率を同時に小さくできるという点で有利である。

などを結論としている。

浦島¹⁶⁾は千鳥配列(1辺が $D+b$ の正三角形)のみについて、従来に比べて円柱の列数を多くし、列間間隔を小さくして実験的検討を行っている。使用水槽は長さ23m、幅0.6m、高さ1.0m。一様水深 $h = 0.5$ m。間隙比 $b/(D+b)$ は0.4、0.5、0.67の3種類、列数は2~15列、周期 T は1.0 secのみの場合と0.5~2.0 secの場合、入射波の波高2.0~14.0cm。反射率、透過率はフーリエ解析による方法で算出している。岸側にはビーチ型消波工を設置している。以下のような結果が得られている。

- 1) 入射波の波形勾配が大きくなると反射率、透過率は小さくなる。
- 2) 間隙比の大きい場合は小さい場合に比べて反射率は小さくなり、透過率は大きくなる。
- 3) 反射率は構造物の波の進行方向への長さ B の波長 L に対する比 B/L に対し、0.25および0.75付近で最小値をとり、0.5および1.0付近で最大値をとる。透過率は B/L の増大とともに減少する。
- 4) 反射率は B/L が大きくなるにつれて周期的に変動しある反射率に漸近していくが、透過率の周期的変動は入射波浪の周期に依存する。

浦島は開口比を0.4、0.5程度で比較的小さいと表現し、0.67程度で大きいと表現している。開口比が0.67の場合では消波効果はあまり大きくなく単独の消波構造物として使用するには問題があるとして、他の消波構造物との組み合わせあるいは二次的な消波構造物として使用すべきであると結論している。

以上に紹介した林等の考え方ははじめ、その他の考え方は主として杭の配列形式の差異による波の減衰、透過を検討したものである。

これらの実験はいずれもが水深が一様な鉛直2次元的な実験条件として行われている。従って平面的には構造物の背後は円柱配列方向に一様な消波効果を想定している。

2.4 結言

円柱杭群を利用した波浪制御に関する研究は、1952年のCostelloの実験的検討に始まり、林等の縮流を考慮した半理論的検討を経て境界値問題としてとらえる理論的検討へと展開しつつある。しかし円柱群の配列はというと、Costello時代から変わっておらず等間隔であり、多数列であり、千鳥配列であって、これらの中で列間間隔や列数を変えてみたりして検討しているにすぎない。

理論的取扱いでは、一様水深であり、微小振幅波理論を仮定しているなどの問題がある。

実験では波高計の設置位置が統一されていないこと、岸側での消波工の種類がまちまちであること、さらにCostelloのときには考慮されていた水路幅による装置のパラメータがCostello以後は考慮されていないことなどが問題としてあげられるであろう。

第3章では円柱杭間隔を変化させた構造物による波浪制御手法について理論的、実験的検討を展開する。それも単なる理論的検討ではなく逆解析可能な手法であることが特長である。

参考文献

1. 望月仁：波浪フィルタ，日本音響学会誌46巻12号，pp.998-1003，1990.
2. 望月仁・安藤繁・三橋渉：波浪周波数フィルタ，電気学会論文誌A，Vol.110-A，No.8，pp.493-500，1990.
3. 望月仁・三橋渉：海洋波浪に対する周波数フィルタ，The Proceedings of TECHNO-OCEAN '90，pp.398-406，1990.
4. 岩田好一郎：消波構造物による波の反射と透過，1980年度水工学に関する夏期研修会講義集，Bコース，土木学会水理委員会，1980.

5. 檀和秀・笈源亮：固定式波浪エネルギー吸収装置を備えた消波工について，土木学会第43回年次学術講演会，pp.700-701，1988.
6. 檀和秀・上山頼人・新町明伸：固定式波浪エネルギー吸収装置（回転ドラム方式）を備えた消波工の反射率の計算について，明石高専研究紀要第31号，pp.37-43，1989.
7. 樫木亨・岩田好一郎：横スリット型防波堤の消波効果と現地への適用条件について，土木学会論文報告集，第237号，pp.63-74，1975.
8. 笈源亮・檀和秀：鋼管を用いた横スリット壁の波浪制御効果について，土木学会第42回年次学術講演会，pp.546-547，1987.
9. R. D. Costello: Damping of Water Waves by Vertical Circular Cylinders, Transactions, American Geophysical Union, Vol.33, No.4, pp.513-519, 1952.
10. R. L. Wiegel: Closely Spaced Piles as a Breakwater, Dock and Harbour Authority, September, p.150, 1961.
11. 林泰造・狩野徳太郎・白井増次郎・服部昌太郎：筒型透過性防波堤の水理特性について，第12回海岸工学講演会講演集，pp.193-197，1965.
12. 林泰造・服部昌太郎・白井増次郎：透過性鋼管防波堤の水理，第13回海岸工学講演会講演集，pp.97-101，1966.
13. 林泰造・服部昌太郎・白井増次郎：透過性鋼管防波堤と底質の移動について，第14回海岸工学講演会講演集，pp.173-178，1967.
14. 林泰造・服部昌太郎：透過性鋼管防波堤とその基部洗掘，第15回海岸工学講演会講演集，pp.292-296，1968.
15. 萩原運弘：多重円筒列型防波堤の反射率・透過率の解析と諸要因の影響，土木学会論文集，第363号／II-4，pp.185-194，1985.
16. 浦島三朗：円柱杭型消波構造物の反射率及び透過率について，苫小牧工業高等専門学校研究紀要第27号，pp.91-97，1992.

第3章 ホログラフィ理論を基礎とした円柱群 配列による海岸波浪制御

3.1 緒言

第1章でホログラフィ理論を応用する波浪制御手法の考え方については少し述べた。

ホログラムに記録された干渉縞から回折された光が像を再生する過程についてはインラインホログラフィの項で述べるが、この記録された干渉縞からの回折を海の波の現象に置き換えて考えると、透過型の消波構造物からの海の波の回折と考えることができる。つまり物体光は物体面からの回折波の集まりであるし、干渉縞から透過する光は回折波として伝わっていくことを考えると、ホログラフィは回折理論が基礎になっていることがわかる。本章では3.2でインラインホログラフィについてまず述べ、その後インラインホログラフィと海岸波浪制御の関係についても述べる。

光ホログラフィでは以下のような条件を必要としている。

- 1) 周波数の等しい波動の干渉では、干渉縞の強度分布は時間に依存しない。
- 2) 干渉縞が安定に存在するため、波として十分長い時間にわたってかつ十分長い距離にわたって周期、波長が一定であることを必要とする。
- 3) 回折積分式の誘導時の条件。
- 4) Fresnel条件、Fraunhofer条件。

上記1)、2)は波そのものの性質であり、3)、4)については種々の近似条件である。このように光ホログラフィでは、光の波長が非常に小さいことなどを考慮して種々の近似条件を取り入れている。光ホログラフィではどのような近似を設けているかについて考え、それらの仮定が水面波に適用可能かどうかを検討する。そのために3.3で近似条件に関して光の回折積分式の誘導から、Fresnel回折、Fraunhofer回折までを検討する。3.4では光の回折積分式を使った数値計算ホログラフィについて検討する。

しかし海の波の場合については、規則波を仮定したとしても波長が大きいなど光の場合の仮定がそのまま応用はできない。3.5では近似条件を設けずに水面波に対する基礎式と境界条件から、波の回折理論を展開している。ホログラフィの記録方式には振幅ホログ

ラムと位相ホログラムの2方法がある。消波構造物をこの2方法にたとえば、振幅ホログラムは1列の杭を並べた場合に、位相ホログラムは多層に杭を並べた場合に相当する。3.5ではさらに多数の円柱群に対する回折理論についても近似条件を考えない省略なしの理論展開をしている。

3.6以降では、ホログラフィ理論を基礎にした振幅ホログラムとしての単列円柱群配列による海岸波浪制御手法について展開する。

3.2 インラインホログラフィと波浪制御

3.2.1 インラインホログラフィ

光ホログラフィは物体を3次元的に記録、再生する手法である。記録されたものをホログラムというが、ホログラムの材料として用いられる感光材料は光の強度すなわち光の振幅の2乗にしか感度をもたないのでホログラムの作成においても物体光のもつ振幅と位相の情報を光の強度分布に変換して記録する必要がある。このためコヒーレントな光源を用いる。インラインホログラフィは参照光を物体光と別にあたえるのではなく、物体面を照射した光のうち物体以外の空間を通過する光を参照光と考える。この参照光と物体からの回折光との干渉縞をホログラムに記録するものである。

情報光（物体光）と参照光の干渉によりホログラムを作成する過程を説明する。

入射光が物体で散乱した波動を物体光と呼び次のように表す。

$$E_o(x,y,z,t)=A_o(x,y,z) \exp i\{\phi_o(x,y,z)+\omega_o t\} \quad (3-1)$$

ここで、添え字 o は物体を、 ω は角周波数を表す。入射光からわけて得られた参照光も同様にして添え字 r で表せば、角周波数 ω は変化しないとして

$$E_r(x,y,z,t)=A_r(x,y,z) \exp i\{\phi_r(x,y,z)+\omega_o t\} \quad (3-2)$$

これら2つの合成波が観測面上で平均強度 $I(x,y,z)$ の分布として記録される（図-3）。

1) 。この記録をホログラムといい、次式で表される。

$$I(x) = \langle \text{Re}(E_o + E_r) \rangle^2$$

$$= O \cdot O^* + R \cdot R^* + O \cdot R^* + R \cdot O^* \quad (3-3)$$

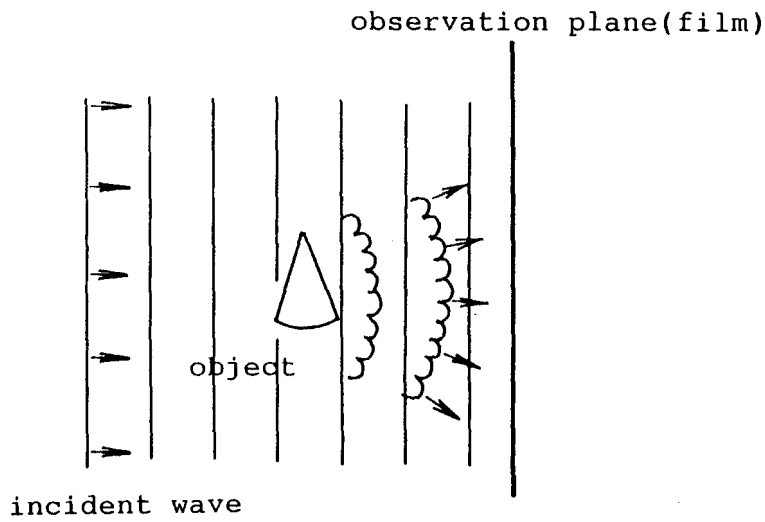


図-3.1 ホログラム作成

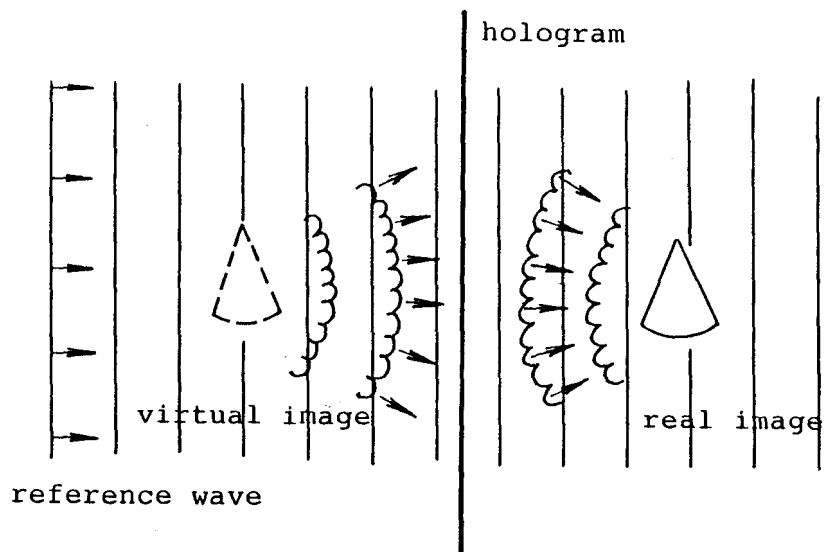


図-3.2 再生

ここで、 O 、 R はそれぞれ物体光、参照光の複素振幅であり $O = A_o(x, y, z) \exp i \phi_o(x, y, z)$ 、 $R = A_r(x, y, z) \exp i \phi_r(x, y, z)$ である。 $\langle \rangle$ は時間平均を、 $\text{Re}()$ は実部を、肩字*は共役複素数を表す。

2つの波の干渉の結果、観測された強度(3-3)は、第1項が物体光のみの強度、第2項が参照光のみの強度であり、単に2つの強度の和ではなく第3、4項が加わる。この第3、4項が干渉縞を表す。この強度 $I(x, y, z)$ の光が観測時間にわたって露光されるため、記録材料が露光エネルギーによって変化する。この記録材料の変化が以後ホログラムを透過する光に対して複素振幅透過率 $t(x, y, z)$ を呈する。 $t(x, y, z)$ と $I(x, y, z)$ の関係は

$$t(x, y, z) = k_1 I(x, y, z) \\ = k_1 (|O|^2 + |R|^2 + O \cdot R^* + R \cdot O^*) \quad (3-4)$$

ただし、 k_1 は定数であり、 $k_1 < 0$ ならネガ、 $k_1 > 0$ ならポジを意味する。

再生像は再生波として平面波 $A_r e^{-ikx}$ を選ぶとホログラム面を $x = 0$ と考えて

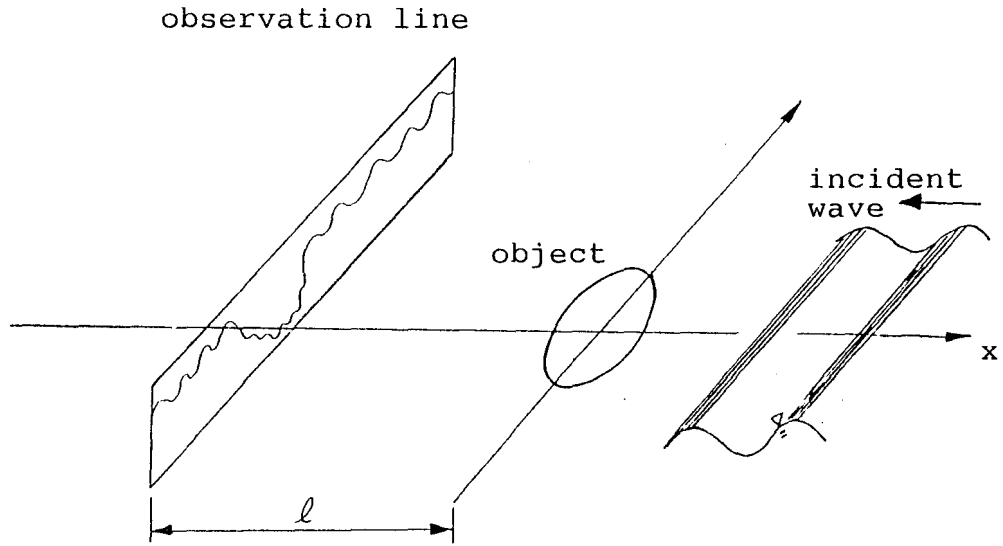
$$tR = k_1 (|O|^2 + |R|^2 + O \cdot R^* + R \cdot O^*) R \\ = k_1 A_r^2 R + k_1 A_o^2 R + k_1 A_r^2 A_o \exp(i \phi_o) + k_1 A_o A_r^2 \exp(-i \phi_o) \quad (3-5)$$

第1、2項は0次回折光で透過する。第3項は直接像(虚像)を、第4項が共役像(実像)を結像する(図-3.2)。ただし、直接像は物体と全く同じものであるが、共役像は物体とはホログラムに関し空間的に対称になる。

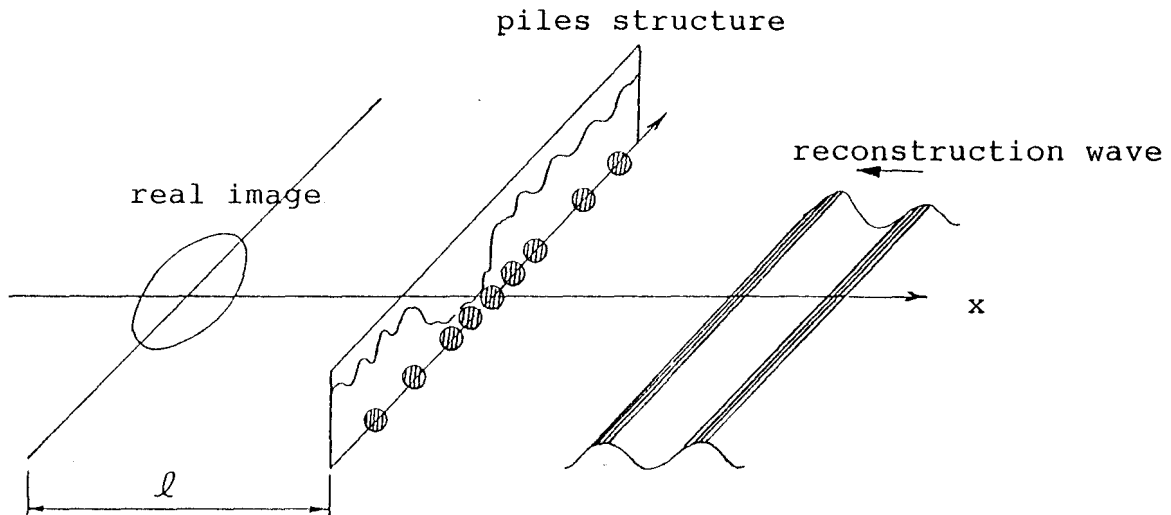
3.2.2 インラインホログラフィの波浪制御への応用

光の場合のインラインホログラフィについては図-3.1、3.2で説明した。実際の

海上での波浪制御にインラインホログラフィを適用したのが図-3.3である。ホログラムに等価な構造物として円柱群を選んでいる。実際の来襲波浪が入射波に相当する。波浪制御領域として円形の島堤を選ぶ。この島堤に入射波が入ったときに発生する散乱波と入射波の合成波の波高分布を島堤からある距離 l 離れた線上で計算する。これが干渉縞に相



(a) ホログラム波高



(b) 再生

図-3.3 水面波ホログラフィ

当するものでホログラム波高と呼ぶことにする。得られたホログラム波高に等価な円柱群構造物を決定する。この透過型構造物に再生波としての実際の来襲波浪が入射すると島堤に相当する実像としての静穏領域が得られる。

多数の円柱群に対する回折波を求めるために、円柱が1本、2本、3本、...、多数本の順に回折波を求めていく。これについては3.5で詳しく述べる。ホログラム波高に等価な円柱群構造物の決定方法については3.6で、再生に相当する波浪制御状況の確認については3.7で詳述する。

3.3 光の回折理論

3.3.1 はじめに

3.1ですでに述べたように光の回折積分式の誘導の際には種々の仮定と近似条件を取り入れている。ここではそれらのうち3)、4)の近似条件を中心に検討する。

Kirchhoffは波動方程式から得られたHelmholtz方程式とGreenの定理からHelmholtz-Kirchhoffの積分定理を導き、さらにこの定理に波長と遮光板との大小からある程度の近似をいれて、Fresnelの設定した傾斜係数を含むFresnel-Kirchhoffの回折積分式を誘導した。

このFresnel-Kirchhoffの回折積分式で与えられる複素振幅は開口から観測面までの距離とともに変化する。光の伝播距離が比較的近い場合をFresnel回折、逆に非常に遠い場合をFraunhofer回折とよぶ。

筧・檀は、ホログラフィ理論が海岸構造物設計に応用できることを示している。¹⁾ 光の場合は、波長が 10^{-6} m程度ときわめて小さく、光波の回折では開口部が波長に比べて非常に大きい等と仮定することは妥当である。筧・檀は波として光を想定し、こうした仮定から導かれたいわゆるFresnel-Kirchhoffの回折積分式を使い、数値計算ホログラフィを応用して、海洋の波浪制御構造物を設計する手法を開発したわけである。従って、光の回折理論を扱ううえでの近似条件を確認する必要がある。以下に光の回折積分式の誘導過程を近似条件に注意しながら述べる。

3.3.2 光の回折理論 (Fresnel-Kirchhoffの回折公式)²⁾

単色スカラー波、

$$V(x,y,z,t)=U(x,y,z)\exp(-i\omega t) \quad (3-6)$$

を考え、真空中ならばこの空間依存部分 $U(x,y,z)$ は、次のHelmholtz方程式を満足する。

$$(\nabla^2+k^2)U=0 \quad (3-7)$$

ここで $k=\omega/c=2\pi/\lambda$ 。 ω は角周波数、 c は光速、 λ は波長。

図-3.4のような閉曲面 S によって囲まれた領域を V とし、その内部の点を P とする。 U は領域の境界および内部で1次および2次の偏微分係数が連続である。 U' も U と同じ条件を満たせばGreenの定理から

$$\iiint_V (U\nabla^2 U' - U' \nabla^2 U) dV = \iint_S \left(U \frac{\partial U'}{\partial n} - U' \frac{\partial U}{\partial n} \right) dS \quad (3-8)$$

$\frac{\partial}{\partial n}$ は S の外向き法線 n に沿った微分である。

U' がHelmholtz方程式を満足すれば(3-8)式の左辺は零となり、

$$\iint_S \left(U \frac{\partial U'}{\partial n} - U' \frac{\partial U}{\partial n} \right) dS = 0 \quad (3-9)$$

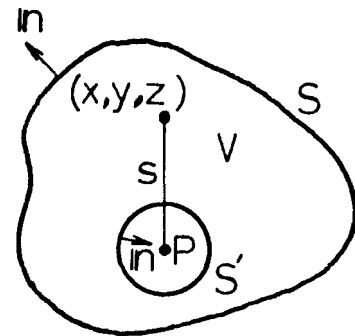


図-3.4 積分領域

$U'(x,y,z)=\frac{1}{s}\exp(-iks)$ とし、 s を P から点 (x,y,z) までの距離とする。 $s=0$ の特異性を

避けるため P を中心とする小球を考え、 P を積分領域から除く。このようにして積分を行うと

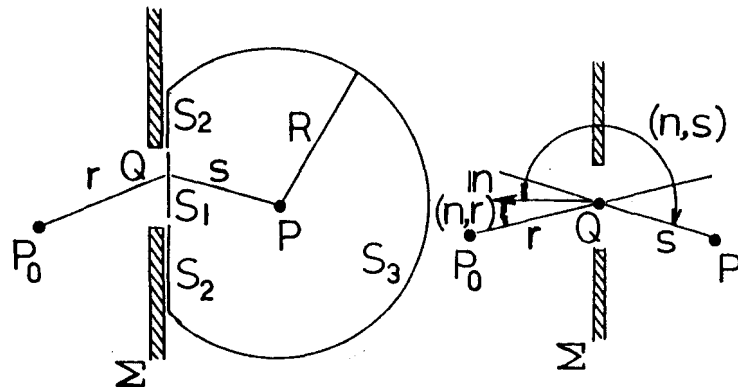


図-3.5 積分領域 (開口部)

$$U(P) = -\frac{1}{4\pi} \iint_S \left\{ U \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{1}{s} \exp(-iks) \right] - \frac{1}{s} \exp(-iks) \frac{\partial U}{\partial n} \right\} dS \quad (3-10)$$

この式がHelmholtz-Kirchhoffの積分定理である。

図-3.5のように点光源 P_0 からでた単色波が、無限にひろがった遮光板 Σ の一部分にある開口 S_1 に向かって伝播していくとする。Pを観測点とする。Pでの光波を決定するには閉曲面S上でKirchhoffの積分を計算すればよい。Sを開口 S_1 と遮光板直後の S_2 、Pを中心とした非常に大きな半径Rをもつ球面 S_3 に分ける。Kirchhoffの積分は

$$U(P) = -\frac{1}{4\pi} \left(\iiint_{S_1} + \iiint_{S_2} + \iiint_{S_3} \right) \left\{ U \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{1}{s} \exp(-iks) \right] - \frac{1}{s} \exp(-iks) \frac{\partial U}{\partial n} \right\} dS \quad (3-11)$$

ここで以下の仮定をする。

a) S_1 上では開口の縁近傍を除いて、 U と $\frac{\partial U}{\partial n}$ の値は遮光板が存在しないときの値と

ほとんど変わらないであろう。これは遮光板の開口部への影響を無視することである。式で示せば

$$\text{on } S_1 : U = U_i, \quad \frac{\partial U}{\partial n} = \frac{\partial U_i}{\partial n} \quad (3-12)$$

b) S_2 上では U と $\frac{\partial U}{\partial n}$ の値はほとんど零である。

$$\text{on } S_2 : U=0, \frac{\partial U}{\partial n}=0 \quad (3-13)$$

ただし、入射波 U_i は

$$\left. \begin{aligned} U_i &= A \frac{e^{-ikr}}{r} \\ \frac{\partial U_i}{\partial n} &= A \frac{e^{-ikr}}{r} \left(-ik \frac{1}{r} \right) \{-\cos(n, r)\} \end{aligned} \right\} (3-14)$$

A は振幅。 (n, r) は外向き n と r のなす角。

c) S_3 についての積分は球面半径 R が非常に大きいときは零になる。

これは R が十分大きくとれば S_3 上の U 、 $\frac{\partial U}{\partial n}$ の値はいくらでも小さくなるのは明かであるが、同時に S_3 の面積は無限大になるので、これだけでは積分値が零になるとはいえない。光波が光源から放射されても、充分遠くでは存在しないことをあげて説明される。

d) r や s が波長に比べて充分大きい場合には、 $1/r$ や $1/s$ が k に比べて無視できるから法線方向微分が次のように近似される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial n} &= A \frac{e^{-ikr}}{r} i k \cos(n, r) \\ \frac{\partial U^-}{\partial n} &= \frac{e^{-iks}}{s} i k \cos(n, s) \end{aligned} \right\} (3-15)$$

以上の仮定をすれば $U(P)$ は

$$U(P) = -\frac{1}{4\pi} \iint_{S_1} \left(A \frac{e^{-ikr}}{r} \frac{e^{-iks}}{s} (-ik) \{-\cos(n,s)\} - \frac{e^{-iks}}{s} A \frac{e^{-ikr}}{r} (-ik) \{-\cos(n,r)\} \right) dS \quad (3-16)$$

$$= \frac{iA}{2\lambda} \iint_{S_1} \frac{e^{-ik(r+s)}}{rs} [\cos(n,r) - \cos(n,s)] dS \quad (3-17)$$

これをFresnel-Kirchhoffの回折積分式という。

さらに図-3.

6のように考えて、開口 S_1 の代わりに入射波の波面 W と、 P_0 を頂点とし開口の縁によってつくられる円錐表面の一部 C を考える。

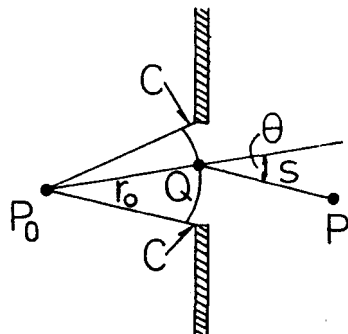


図-3.6 開口部

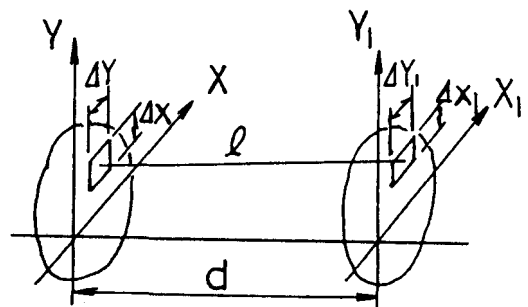


図-3.7 座標系

波面 W の曲率半径が十分に大きければ、 C から

の寄与は無視できる。波面 W の上では $\cos(n, r_0) = 1$ である。 $\theta = \pi - (r_0, s)$ とすると (3-17) 式より

$$U(P) = \frac{i}{2\lambda} \frac{A \exp(-ikr_0)}{r_0} \iint_W \frac{e^{-iks}}{s} (1 + \cos \theta) dS \quad (3-18)$$

この(3.18)式の関係を図-3.7のような座標関係にあわせて書き直せば、物体のある範囲以外は積分値は零であり、物体面での光は場所と共に変化すると考えて積分記号の中へ入れる。

$$U(x_1, y_1) = \frac{i}{2\lambda} \iint \frac{A \exp(-i k r_0)}{r_0} \frac{1 + \cos \theta}{1} \exp(-i k l) dx dy \quad (3-19)$$

物体面への入射光と回折光とのなす角 θ が小さいときは $\cos \theta = 1$ と近似でき

$$E_0(x, y) = \frac{A}{r_0} \exp(-i k r_0) \text{ と置くと}$$

$$U(x, y) = \frac{i}{\lambda} \iint E_0(x, y) \frac{\cos(-i k l)}{1} dx dy \quad (3-20)$$

物体面、観測面の広がり (x, y) , (x_1, y_1) が両面の間隔 d に比べて小さいと仮定できるとき

$$U(x_1, y_1) = \frac{i}{\lambda d} \iint E_0(x, y) \exp(-i k l) dx dy \quad (3-21)$$

条件 $\frac{k}{8d^3} \{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2\}^2 \ll 2\pi$ が成り立てば Fresnel 回折となり

$$U(x_1, y_1) = \frac{i \exp(-i k d)}{\lambda d} \iint E_0(x, y) \exp\left[-\frac{i k}{2d} \{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2\}\right] dx dy \quad (3-22)$$

条件 $\frac{k(x^2 + y^2)}{2d} \ll 2\pi$ が、さらに成り立てば(3.23)式の Fraunhofer 回折となる。

$$U(x_1, y_1) = i \exp(-i k d) \exp\left\{-\frac{ik}{2d}(x_1^2 + y_1^2)\right\} \iint E_0(x, y) \exp\left\{\frac{ik}{d}(xx_1 + yy_1)\right\} dx dy \quad (3-23)$$

以上、数式の誘導の上での仮定をあげてみた。これらは開口の大きさ、波長、曲率半径についての大小関係の条件である。特に開口の大きさが波長に比べて大きいとした時に遮光板の影響を無視すること、球面半径が波長に比べて十分大きいとしての方向微分の近似などは、海岸域で観測される水面波の波長を100m程度までと考えても、構造物の大きさを考えればもはや使えない条件であることがわかる。円柱と円柱の間で無限回にわたる反射が繰り返され、その影響も広がっていく。したがってこれらの反射波を考慮せねばならない。

3.3.3 回折波の離散変換

Fraunhofer回折(3-23)はフーリエ変換であるから、理論値と離散変換値とを比較することができる。離散変換式は次の通り。

$$U(x_1, y_1) = \frac{i \exp(-ikd) \exp\left\{-\frac{ik}{2d}(x_1^2 + y_1^2)\right\}}{\lambda d} \sum_m \sum_l E_0(m \Delta x, l \Delta y) \exp\left\{\frac{ik}{d}(m \Delta x x_1 + l \Delta y y_1)\right\} \Delta x \Delta y \quad (3-24)$$

1次元の場合に離散変換が連続変換の近似になっているかどうかを矩形パルス関数や有限幅bの余弦関数などの簡単な例で確かめた。²⁾ 分割数Nが小さすぎるとghostが現れた。分割幅を変化させて離散変換してみると積分幅bが大きくなるにつれて分割数Nも大きくする必要があり、ほぼ分割幅が0.1程度以下である必要があることがわかった。

3.3.4 回折積分式誘導の上での仮定

Fresnel-Kirchhoffの回折積分式(3-17)は以下のような仮定のもとに導かれていることがわかる。

1) 単色スカラー波の空間依存部分U、U'は領域の境界上および内部で1次、2次の

偏微分係数が連続である。

- 2) 遮光板直後の積分領域を非常に大きな半径をもつ球面に考えている。
- 3) 積分領域内の開口部分上では U や $\partial U / \partial n$ の値に遮光板は影響を与えない。つまり遮光板の開口部への影響を無視する。
- 4) 積分領域内の遮光板上では U や $\partial U / \partial n$ の値はほとんど零である。
- 5) 積分領域内の開口部と遮光板を除いた球面上では半径が大きいため積分値は零になる。
- 6) 点光源から開口部上の点までの距離 r や開口上の点から積分領域としての球の中心までの距離 s が波長に比べて大きいときは $1/r$ や $1/s$ が波数 k に比べて無視し、法線方向微分を近似する。

(3-18) 式はさらに次の条件を仮定する。

- 7) 開口部での波面の曲率半径は十分に大きい。これは開口部と点光源との距離が大きいことに相当する。

(3-20) 式はさらに

- 8) 物体面への入射光と回折光とのなす角が小さい。

(3-21) 式はさらに

- 9) 物体面、観測面の広がりや両面間の距離に比べて小さい。

Fresnel回折はFresnel条件が、Fraunhofer回折はFraunhofer条件がさらに加わる。

3.4 数値計算ホログラフィ (1次元物体に対するインラインホログラフィ)

数値計算ホログラフィは時空間的コヒーレンシーに対して心配する必要が無く便利であるので1次元物体表面での振幅反射係数を導入して像再生の数値実験を実施した。⁵⁾ここではフラウンホーファー条件、フレネル条件を考慮しない段階での回折積分式を用いている。

3.4.1 光の回折理論

1次元の場合の光波を複素表示で表現する。

$$E_0(x, t) = A_0(x) \exp\{i(\phi_0(x) + \omega_0 t)\} \quad (3-25)$$

時間項を省略した部分 $A_0(x) \exp\{i\phi_0(x)\}$ を複素振幅という。

z 軸に平行に進む平面波は

$$A(z, t) = A_0 \exp\{i(kz - \omega t)\} \quad (3-26)$$

t は時間、 k は波数、 ω は角周波数、 A_0 は振幅である。

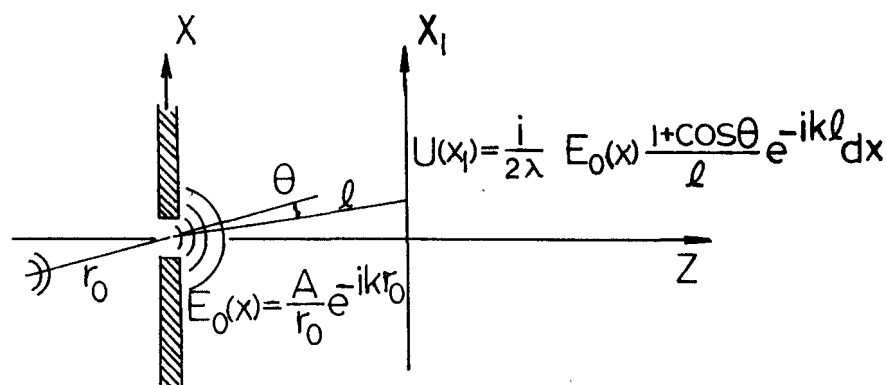


図-3.8 回折積分

球面波は

$$V(r, t) = V(r) \exp\{i(\omega t)\} = \frac{a}{r} \exp(-ikr) \exp(i\omega t) \quad (3-27)$$

r は波源からの距離、 a は波源から単位距離離れた点での振幅である。初期位相は考えていない。

図-3. 8 は光の回折積分の説明をしている。光がある場所から物体面の x 軸上の点に球面波として伝わってくる。物体面に 1 個のスリットがあったとすればそのスリットから物体光 $E_0(x)$ が発生する。スリットがたくさんあればこれらを足し合わせれば良い。観測面 x_1 軸上で観測される回折波 $U(x_1)$ は光波の回折積分式 (3-19) から、1 次元に書き直して

$$U(x_1) = \frac{i}{2\lambda} \int E_0(x) \frac{1 + \cos \theta}{1} \exp(-ikl) dx \quad (3-28)$$

$\cos \theta \doteq 1$ の場合

$$U(x_1) = \frac{i}{\lambda} \int E_0(x) \frac{\exp(-ikl)}{1} dx \quad (3-29)$$

$\frac{1}{l} \doteq \frac{1}{d}$ と考えられる場合は

$$U(x_1) = \frac{i}{\lambda d} \int E_0(x) \exp(-ikl) dx \quad (3-30)$$

$\frac{k}{8d^3} \{(x-x_1)^2\}^2 \ll 2\pi$ の場合はフレネル回折となり

$$U(x_1) = \frac{i \exp(-ikd) \exp\left\{-\frac{ik}{2d} x_1^2\right\}}{\lambda d} \int E_0(x) \exp\left\{\frac{ik}{d} x x_1\right\} dx \quad (3-31)$$

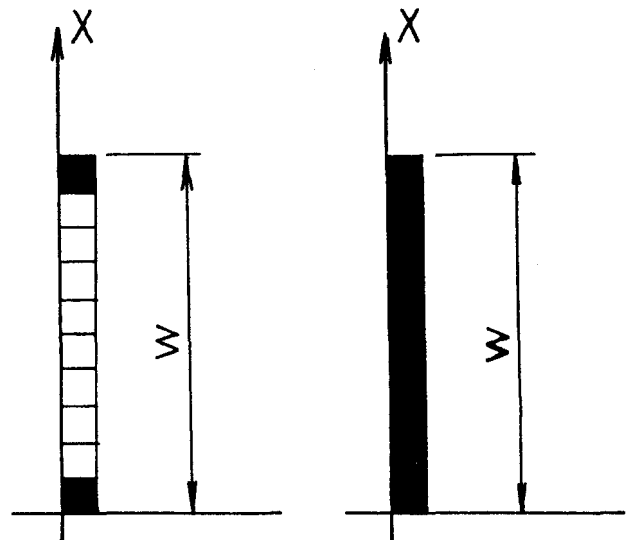
さらに $\frac{kx^2}{2d} \ll 2\pi$ の場合はフラウンホーファー回折となり

$$U(x_1) = \frac{i \exp(-ikd)}{\lambda d} \int E_0(x) \exp\left[-\frac{ik}{2d}\{(x-x_1)^2\}\right] dx \quad (3-32)$$

今回は式(3-29)の回折積分式を用いて、インラインホログラフィの場合の再生を数値計算で行った。したがって、 $\cos\theta \approx 1$ とみなせる条件が付いている。

3.4.2 回折波の強度分布

単スリットに相当する場合として物体の微小要素が1個の場合を考える(図-3.9参照)。回折波の強度 I_d は(3-3)式から回折波の複素振幅の絶対値の2乗で計算する。ここで光の周期は 10^{-14} sec 程度と非常に小さいので光のホログラフィでは観測時間が光の周期に比べて十分に長いという条件から、波の強度分布は時間に関係しないことが利用されている。



(a) 2要素 (w: 物体幅) (b) 1要素

図-3.9 物体像

この強度分布が物体面からの距離とともにどのように変化するかを示

したのが図-3.10である。強度分布は左右対称であるのでほぼ右側半分のみを表示している。物体面と観測面との距離がだんだん大きくなって離れるにつれて回折波強度の分布は多峰から2つの山になり、次第に1つの山になっていくのがわかる。この図では $d = 150$ mで双峰、 $d = 1000$ mで1つの山になっている。回折強度は d が大きくなるにつれて小さくなっていく。この図ではそれが表現されていない。

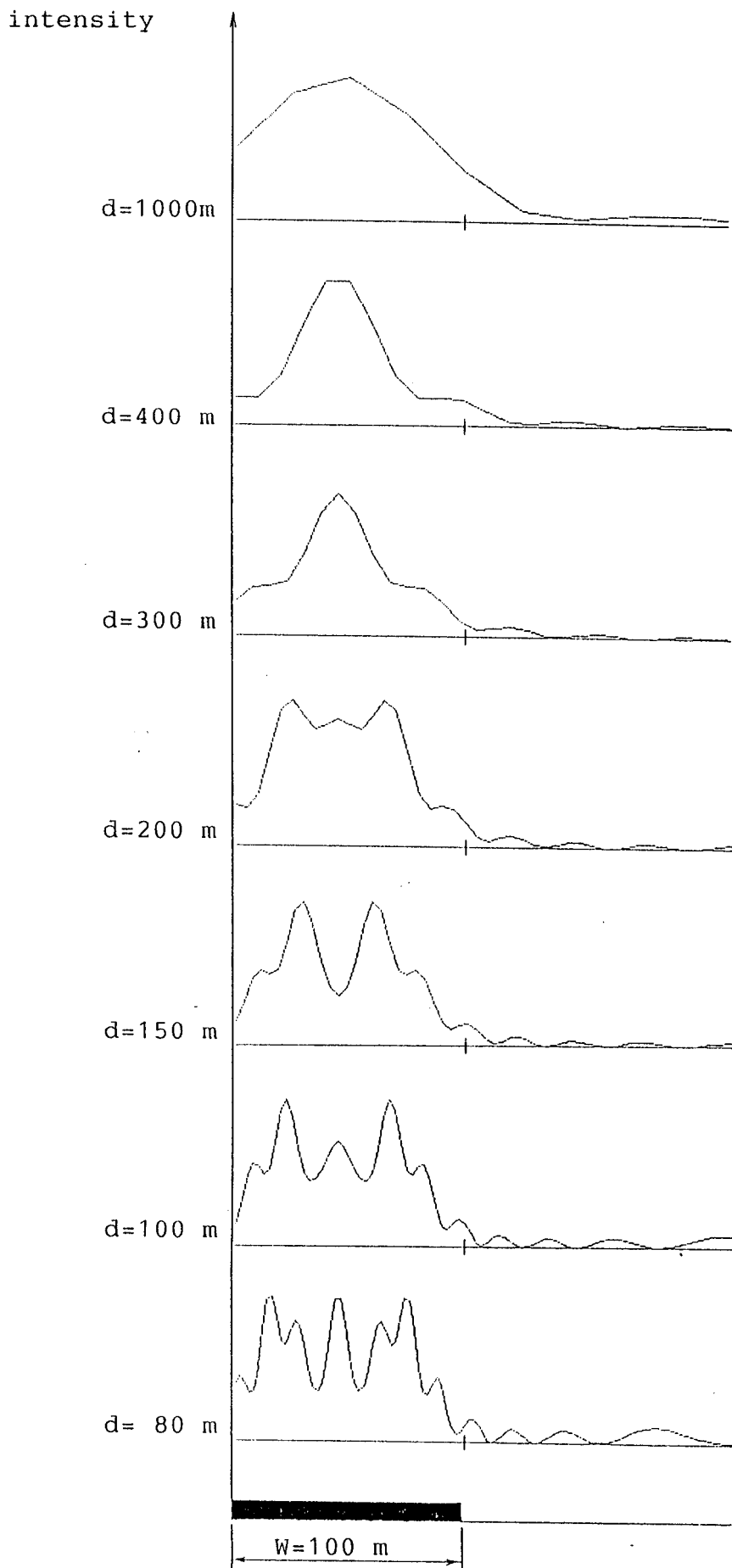


図-3. 10 物体面からの距離による回折波強度分布の変化
 (波長 $\lambda = 10$ m、周期 $T = 4$ sec)

3.4.3 複素振幅透過率

複素振幅透過率 $t(x)$ は (3-4) 式のようにホログラム強度 $I(x)$ の定数倍であると仮定する。

$$t(x) = k_1 I(x) \quad (3-33)$$

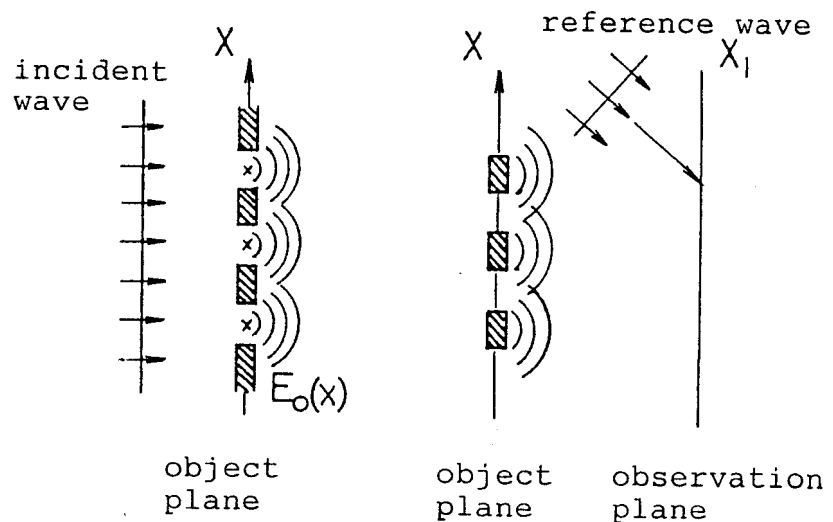
数値実験では $k_1 = 1$ とした。

3.4.4 数値計算

信号（強度）が微弱であるため計算は倍精度で行っている。離散変換が連続変換の近似になっているかどうかについては、簡単な例で確かめた。得られたホログラム値をそのまま再生したのでは、再生強度は原点付近に大きなピークが現れこれを図化したのではピークだけが目立って解像ができない。解像ができるようにホログラム値の平均を0にする操作を加える。このようにしてもなお、像に強度のピークが現れる場合があり、これは参照波の振幅を回折波の強度程度にあわせることでかなりの改善がみられる場合もあった。

3.4.5 物体光

1次元物体を考え、物体幅を W とする。物体幅 W を $N \times$ 個に分割する。今回は $N \times$ をすべて10としている。物体を再生しているかどうかをみるために物体の要素数を2個とし、しかも分解能もみるために要素を右端、左端



(a) スリットから透過 (b) 物体から反射

図-3.11 物体光

に配置した (図-3.11a 参照)。物体面からは物体光 $E_o(x)$ が発生する。物体光は図-3.11b のように、物体があるところからは球面波の光が出て、無いところからは光が出ないとする。これは図-3.11a のようにスリットへ平面波 $A_0 \exp(-ikz)$ ($A_0=1, z=0$) が入射してきて、スリットから物体光として出ていくことに相当する と考える。

3.4.6 参照光

インラインホログラフィであるから、参照光としては z 軸に平行に平面波が出ている と考える。

$$A(z, t) = A_r \exp\{i(kz - \omega t)\} \quad (3-34)$$

$A_r = 1$ とする。初期位相は考えない。

3.4.7 ホログラム

図-3.12 のように観測面で物体光と参照光の合成波の強度分布 I を次式で計算する。

$$I(x_1) = |O + R|^2 \quad (3-35)$$

O 、 R はそれぞれ物体光、参照光の複素振幅である。

回折波は 3-4-2 と同様にして計算する。

観測面での微小要素としての分割幅 Δx_1 は、サンプリング定理から最大空間周波数 $\nu_{x \max}$ を次式からきめる。

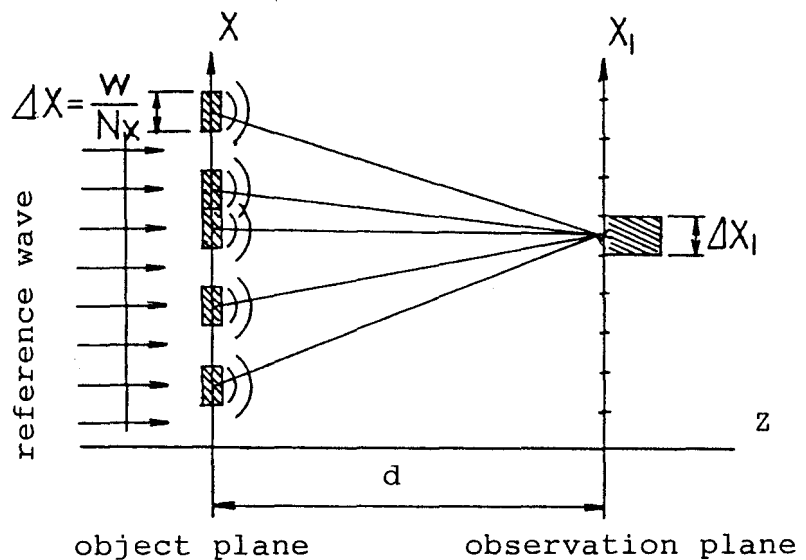


図-3.12 回折計算

$$v_{x_{max}} = \frac{1}{2\Delta x} \quad (3-36)$$

Δx は物体の分割幅であり、 $\Delta x = w / N_x$ である。 N_x は物体の分割数である。その最大空間周波数を $4 N_x$ 個に分割している。¹⁾ ここで式 (3-29) の変換がフーリエ変換にはなっていないが、そのまま応用できると仮定する。

3-4-8 再生

ホログラムは複素振幅透過率を呈する。(3-33) で述べたように $t = k_1$ ($k_1 = 1$)

である。再生波 R_c としては参照波と同じ波を用いるから

$$\begin{aligned} t R_c &= t \cdot A_r \cdot \exp(-i k z) \\ &= k_1 I \cdot A_r \cdot \exp(-i k z) \\ &= I \end{aligned} \quad (3-37)$$

ここで、 $k_1 = 1$ 、 $A_r = 1$ 、 $z = 0$ とした。

この波が物体波が観測面へ伝播したと同様に、図-3.13のようにホログラム面からでていき回折されて再生面 x_2 上で観測される。再生面での回折波強度を計算して像を得る。この再生過程において、ホログラムを透過した光が実像、虚像を再生することになる。以上のように考えると、ホログラムからは $I(x_1)$ というさまざまな強度の光が発生することになる。

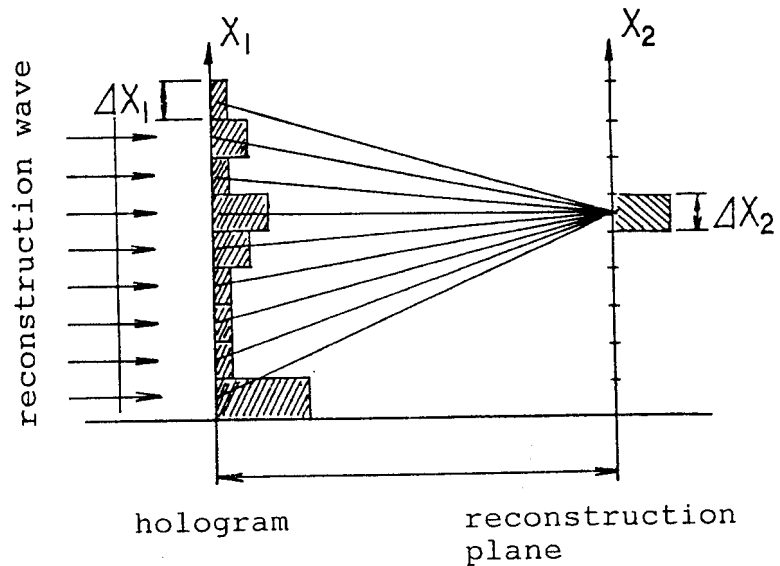
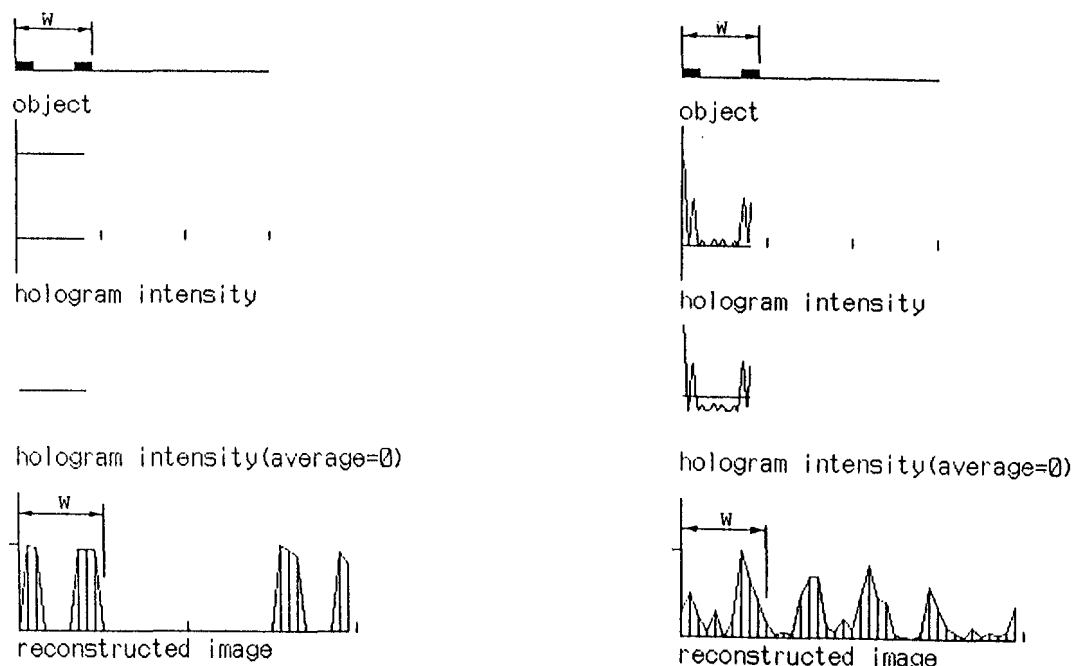


図-3.13 再生

数値計算では複素振幅透過率を上記のように考え、微小面要素から球面波として伝わる
 と考える。分離した2要素の物体像に対する再生例を、良い例と悪い例について1例づつ
 示す。図-3.14 a は良い再生例で、再生像もよく分解されている。しかし物体の大き
 さ w が 10^8 m と非常に大きいことや、物体面から観測面までの距離が 10^9 m と遠く離れ
 すぎておりホログラム強度も非常に小さくなっていること、さらにホログラム強度の変化
 も小さいなど問題もある。逆に図-3.14 b は悪い再生例でどこに物体像があるか判別
 できない。



(a) 再生が良い例

($w=10^8$ m、 $\lambda=10$ m、 $T=4$ sec、 $d=10^9$ m)

(b) 再生が良くない例

($w=1$ m、 $\lambda=10^{-6}$ m、 $T=10^{-5}$ sec、 $d=10$ m)

図-3.14 再生例

3.4.9 波長と周期

波長 λ と周期 T は光波と水面波を想定して以下の通り2種類実施した。

光波	$\lambda = 10^{-6}$ m	、	$T = 10^{-14}$ sec
水面波	$\lambda = 10$ m	、	$T = 4$ sec

3.4.10 再生例

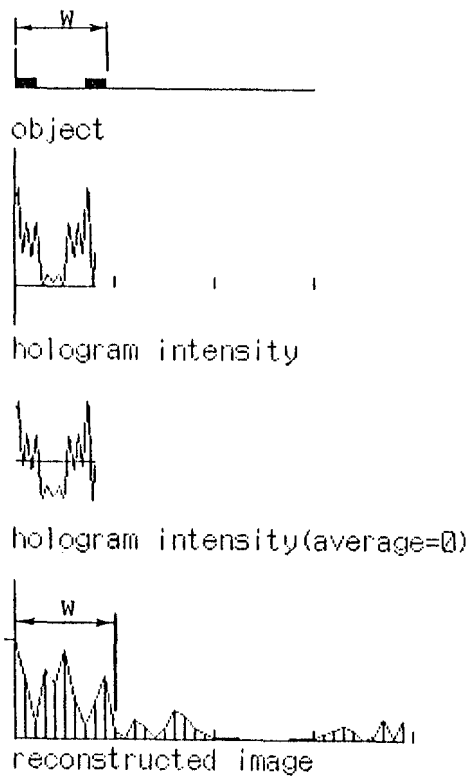
計算された再生結果のうち代表的な再生図を示す。再生図は上から順に物体像、ホログラム強度、ホログラム強度分布を平均値が0になるように変換したもの、再生像となっている。

(イ) 光波の場合の再生例。

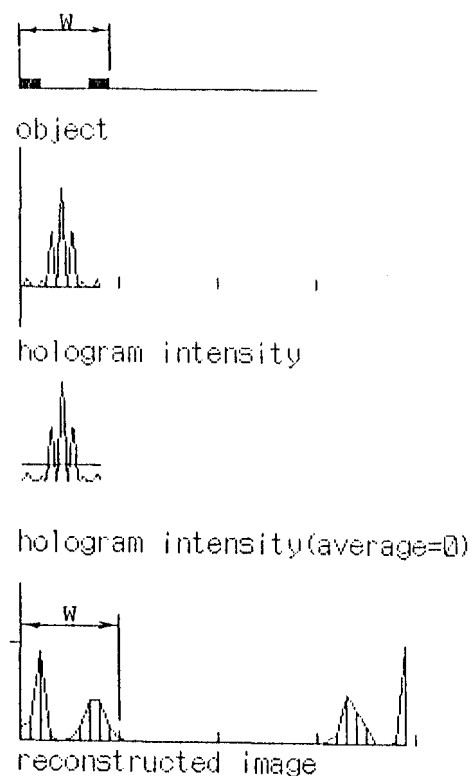
$W/\lambda = 10$ の場合に、 W/d の値を10倍ずつに変化させた時の再生状況を図-3.15 a, b, c, d, e に示す。(a) では物体像が再生されておらず、(b)、(c)、(d) と w/d が大きくなるにつれて再生されるようになり、 w/d が1程度では再び再生されなくなる。したがって $w/\lambda = 10$ の場合は、再生されるには w/d が 10^{-3} から 10^{-1} 程度である必要がある。

(ロ) 水面波の場合の再生例。

$W/\lambda = 10^2$ の場合に、 W/d を10倍ずつ変化させた時の再生状況を図-3.16 a, b, c に示す。再生されるにはこの場合、 w/d が1程度である必要がある。



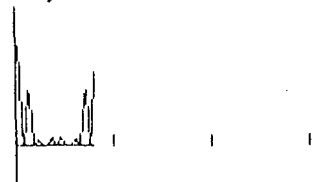
(a) $w/\lambda = 10^5$, $w/d = 10^{-4}$



(b) $w/\lambda = 10^5$, $w/d = 10^{-3}$



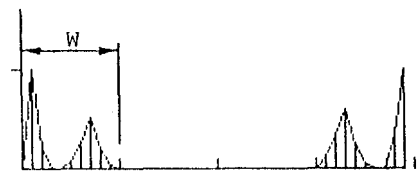
object



hologram intensity



hologram intensity(average=0)

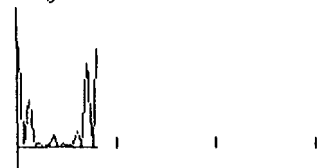


reconstructed image

(c) $w/\lambda = 10^5$, $w/d = 10^{-2}$



object



hologram intensity

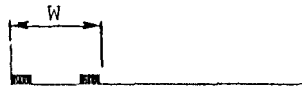


hologram intensity(average=0)

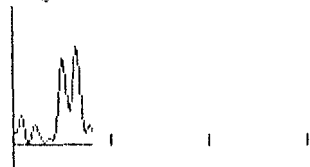


reconstructed image

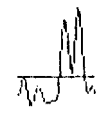
(d) $w/\lambda = 10^5$, $w/d = 10^{-1}$



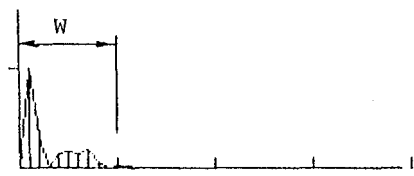
object



hologram intensity



hologram intensity(average=0)



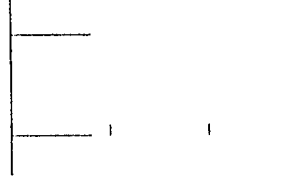
reconstructed image

(e) $w/\lambda = 10^5$, $w/d = 1$

図-3.15 光波の場合の再生例



object



hologram intensity



hologram intensity(average=0)

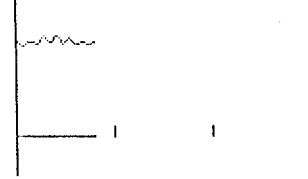


reconstructed image

(a) $w/\lambda = 10^2$, $w/d = 10^{-1}$



object



hologram intensity



hologram intensity(average=0)

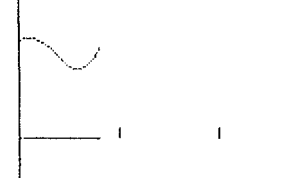


reconstructed image

(b) $w/\lambda = 10^2$, $w/d = 1$



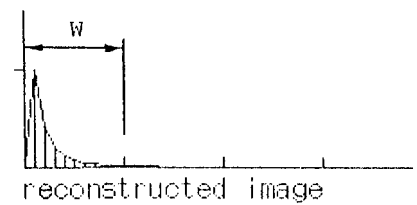
object



hologram intensity



hologram intensity(average=0)



reconstructed image

(c) $w/\lambda = 10^2$, $w/d = 10$

図-3.16 水面波の場合の再生例

3.4.11 波長 λ と物体幅 w 、物体面と観測面との距離 d の関係

像再生状況は図-3.14 aのように物体を物体があるように認識できる程度であれば○、図-3.14 bのように認識不可能であれば×という記号をつける。

物体の要素数は2箇所であるのに3箇所ピークがあるような場合も再生が正確であるとはいえないので×とした。しかし図-3.17のように一方のピークが他のピークに比べてかなり大きい場合にはピークが2個とみなせるので、この場合は△と判定した。

このように像再生状況を判定して、物体幅 w と波長 λ の比 w/λ 、両面間距離 d と波長 λ の比 d/λ を変化させて像再生状況を調べて表にしたのが表-3.1、3.2である。表-3.1は光波を想定した場合の像再生状況判定表であり、表-3.2は水面波の場合である。

どちらの場合もほぼ同じ傾向を示している。すなわち表-3.1、3.2に示したような w/λ が約 10^2 以上、 w/d が約1以下の三角形状の範囲でないと像再生は良好でない。

以上の結果は $w/\lambda = 10^7$ で $w/d = 1$ の場合などでは物体の大きさが 10^7m と実際的でない場合もあるがとりあえず計算している。したがって再生状況が良好だといっても物体の大きさが大きすぎるとか、両面間距離 d が大きすぎるなど現実的でない場合も含まれている。物体面と観測面の距離が大きくなりすぎると、観測面での光の強度が非常に小さくなり測定不可能になる場合も生じるであろう。そのときは高精度の光センサーがあれば測定可能となる。

インラインホログラフィによる1次元物体の像再生を数値計算ホログラフィでパソコンを使用して行った。再生は物体の大きさと波長、物体面と観測面との距離の比に大きく影響される。使用する波の波長に対する物体の大きさの比は約 10^2 以上、また波長に対する物体面と観測面との距離の比は約1以下でなければならないことがわかった。

今回は物体の分割数が10個という1種類についてだけ行っており、物体の大きさと分

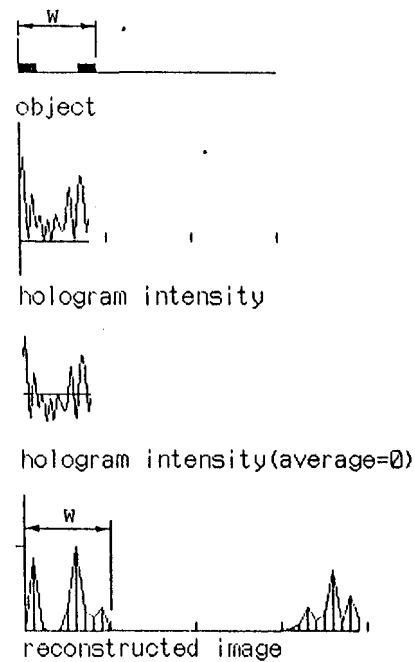


図-3.17 再生の判定が△の場合の例

割数との関係については検討が必要である。

表-3.1 再生状況 (光波の場合)

($\lambda = 10^{-6}$ m, $T = 10^{-15}$ sec)

	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
10^1	×	×	×	×	×	×	×	×
10^0	×	×	×	×	×	×	×	×
10^{-1}	×	×	×	○	△	○	○	△
10^{-2}	×	×	×	×	○	○	○	△
10^{-3}	×	×	×	×	×	○	○	○
10^{-4}	×	×	×	×	×	×	○	○
10^{-5}	×	×	×	×	×	×	×	○

表-3.2 再生状況 (水面波の場合)

($\lambda = 10$ m, $T = 4$ sec)

	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
10^1	×	×	×	×	×	×	×	×
10^0	×	×	○	△	△	△	○	○
10^{-1}	×	△	×	○	○	○	○	○
10^{-2}	×	×	×	×	○	○	○	○
10^{-3}	×	×	×	×	×	○	○	○
10^{-4}	×	×	×	×	△	×	○	○
10^{-5}	×	×	×	×	×	×	×	○

3.5 円柱群に対する波の回折理論

3.5.1 はじめに

従来波の回折問題は、回折図にみられるように、防波堤なり消波構造物の平面形状が決まっており、その条件で回折波高の分布を求めたものであった。従って湾内の回折による波高がどの程度低減できるかどうかを制御することはできるが、湾内の指定された領域の波高を低減させたいという場合には、湾と同様その周りを全部防波堤なり消波構造物で囲む以外に方法はなかった。

本論で提案している波浪制御手法は、ある限られた領域の周りを防波堤等で囲まずに、ある程度離れた場所に波浪制御構造物を設置することで波浪制御したい領域の波高を低減させると考えている。

まず実際の波浪データや使用する鋼管について述べる。さらに円柱が1本、2本、3本、

多数本の各場合の波の回折について近似条件を設けずに理論展開する。

3.5.2 実際の波浪^{6), 7), 8)}

神戸港の波浪データを例に考える。表-3.3は神戸港の第7防波堤から南に2926 m離れた地点の水深-17 mの海底に設置された超音波式波高計で測定された1988年のデータである。このデータをもとに周期4 sec、水深10 m、波長24.5 m程度の波を計算条件とした。

表-3.3 神戸港の最大有義波と最高波⁷⁾

月		1	2	3	7	8	9	10	年間
最大有義波	$H_{1/3}$ m	1.21	1.67	0.81	0.83	0.75	0.88	0.90	1.67
	$T_{1/3}$ s	3.8	4.6	3.4	3.8	3.0	4.0	3.6	4.6
最高波	H_{max} m	1.91	2.63	1.28	1.49	1.44	1.39	1.54	2.63
	T_{max} s	3.6	3.6	3.4	3.7	3.2	4.3	3.6	3.6

3.5.3 材料としての鋼管⁹⁾

鋼管杭としてではなく、型枠材料としてはかなり大きい直径の鋼管が使用されてはいる。製品として用意されている鋼管杭を円柱杭として考えると、直径は約2 mまでである。しかし4 m、10 m程度の鋼管杭も将来製品として可能であろうと考えモデルに使用している。

3.5.4 基礎式と境界条件

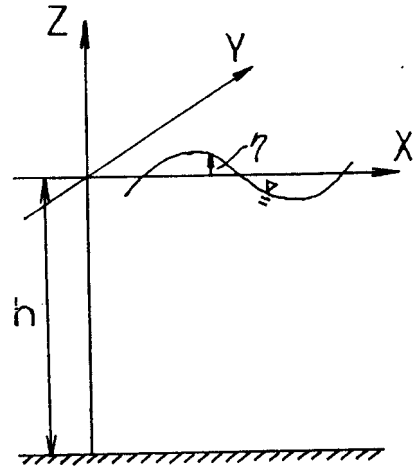
座標は図-3.18のようにとる。流体は理想流体で、非圧縮性である。非回転運動であると考え、速度ポテンシャル Φ が存在し

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (3-38)$$

微小振幅波を仮定すると、境界条件は水表面 ($z=0$) で

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = w \Big|_{z=0} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (3-39)$$

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (3-40)$$



g は重力加速度。境界面における流体の出入りはない。境界面での法線方向を n として

図-3.18 座標系

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (3-41)$$

水深 h は一定である。

(3-41) の境界条件を満たす速度ポテンシャルを

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi_0 \phi(x, y) \cosh k(h+z) \exp(i\sigma t) \quad (3-42)$$

$$\Phi(r, \theta, z, t) = \phi_0 \phi(r, \theta) \cosh k(h+z) \exp(i\sigma t) \quad (3-43)$$

$k = \frac{2\pi}{L}$: 波数、 $\sigma = \frac{2\pi}{T}$: 角周波数。(3-39)、(3-40)、(3-42) から

$$\sigma^2 = gk \cdot \tanh kh \quad (3-44)$$

(3-42) を (3-40) に代入して

$$\eta = -\frac{\phi_0 \sigma i}{g} \phi(x, y) \cosh kh \exp(i\sigma t) \quad (3-45)$$

いま入射波は x 軸の正の方から負の方向に入射すると考えており、無限遠では

$$\phi(x, y) = \left|_{r=\infty} = e^{ikx} \text{ と考えられる。だから}$$

$$\eta = -\frac{\phi_0 \sigma i}{g} \cosh kh \exp\{i(kx + \sigma t)\} \quad (3-46)$$

実部を η とするから、入射波高を H_I とすると、 $\frac{H_I}{2} = \frac{\phi_0 \sigma}{g} \cosh kh$ より

$$\phi_0 = \frac{g H_I}{2 \sigma \cosh kh} \quad (3-47)$$

と決定できる。

条件として、入射波の周期が与えられると、水深も与えられるから (3-44) 式から波長 L がわかる。

波高分布 H は

$$H = \frac{2 \phi_0 \sigma}{g} |\phi(x, y)| \cosh kh \quad (3-48)$$

波として規則波、水深は一定であるから (3-44) から k は不変となり波高の平面分布 H は絶対値 $|\phi(x, y)|$ に定数を掛けたものとして表される。

(3-43) を (3-38) のラプラスの方程式に代入すると、次の Helmholtz の方程式が得られる。

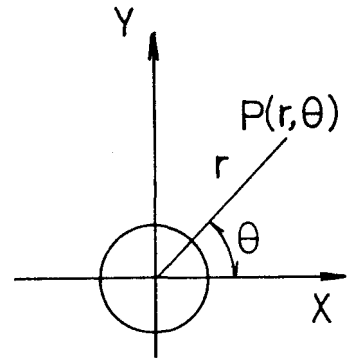
$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + k^2 \phi = 0 \quad (3-49)$$

3.5.5 円柱1本の場合¹⁰⁾

速度ポテンシャルを(3-43)式と同様におく。

入射波の方向をx軸の正から負の方向とすると、無限遠では散乱波は消滅すると考えて

$$\phi(r, \theta) \Big|_{r=\infty} = \exp(ikx) = \exp(ikr \cos \theta) \quad (3-50)$$



としてよい。

円柱から回折散乱した波は

図-3.19 座標系(円柱1本)

$$\phi(r, \theta) = \exp(ikr \cos \theta) + \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n H_n^{(2)}(kr) \cos n\theta \quad (3-51)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(kr) \exp(in\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n H_n^{(2)}(kr) \cos n\theta \quad (3-52)$$

$$= J_0(kr) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n J_n(kr) \cos n\theta + \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n H_n^{(2)}(kr) \cos n\theta \quad (3-53)$$

$$= J_0(kr) + \alpha_0 H_0^{(2)}(kr) + \sum_{n=1}^{\infty} \{2i^n J_n(kr) + \alpha_n H_n^{(2)}(kr)\} \cos n\theta \quad (3-54)$$

ここに、 J_n はBessel関数、 $H_n^{(2)}$ は第2種のHankel関数である。(3-51)式の第2項が散乱項を表す。

境界条件は、円柱の半径を r_0 として

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0 \quad (3-55)$$

(3-54) と (3-55) より

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= -\frac{J_1(kr_0)}{H_1^{(2)}(kr_0)} \\ \alpha_n &= -2i^n \frac{nJ_n(kr_0) - kr_0 J_{n+1}(kr_0)}{nH_n^{(2)}(kr_0) - kr_0 H_{n+1}^{(2)}(kr_0)} \end{aligned} \right\} (3-56)$$

3.5.6 円柱2本の場合 (2本の円柱に直角入射する場合) ¹¹⁾

入射波の速度ポテンシャルを (3-43) と同様におく。円柱より無限遠におけるポテンシャル e^{ikx} を円柱 Γ_1 、 Γ_2 の中心を原点にする円柱座標で表し、各々を ϕ_0^1 、 ϕ_0^2 とおけば

$$\begin{aligned} \phi_0^1 &= \exp(ikr_1 \cos \theta_1) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(kr_1) \exp(in\theta_1) \end{aligned} \quad (3-57)$$

$$\begin{aligned} \phi_0^2 &= \exp(ikr_2 \cos \theta_2) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(kr_2) \exp(in\theta_2) \end{aligned} \quad (3-58)$$

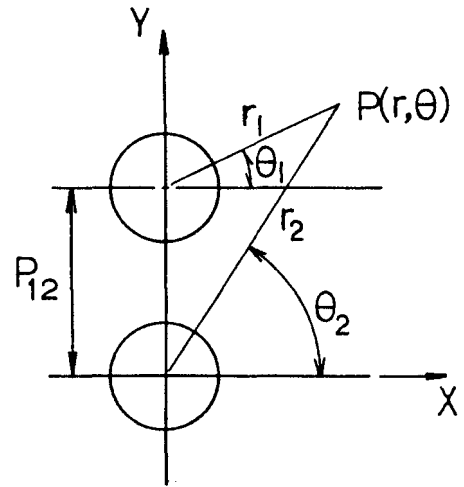


図-3.19 座標系 (円柱2本)

となる。

いま、 ϕ_0^1 が円柱 Γ_1 に入射したときの反射波の速度ポテンシャルを ϕ_1^1 、 ϕ_1^1 が円柱 Γ_2 に入射したときの反射波のポテンシャルを ϕ_2^2 とし、以下同様に図-3.20 のように考える。

円柱 Γ_1 に入ってきて j 回目の散乱をする場合
の散乱波を

$$\phi(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_{j,n} H_n^{(2)}(kr_1) \cos n\theta_1 \quad (3-59)$$

円柱 Γ_2 に入ってきて j 回目の散乱をする場合
の散乱波を

$$\phi(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \beta_{j,n} H_n^{(2)}(kr_2) \cos n\theta_2 \quad (3-60)$$

$$\begin{array}{l} \phi_0^1 \rightarrow \textcircled{1} \\ \phi_1^1 \downarrow \quad \phi_2^2 \uparrow \quad \phi_3^1 \downarrow \dots \\ \textcircled{2} \end{array}$$

(a) scattered at cylinder 1

$$\begin{array}{l} \textcircled{1} \\ \phi_1^2 \uparrow \quad \phi_2^1 \downarrow \quad \phi_3^2 \uparrow \dots \\ \phi_0^2 \rightarrow \textcircled{2} \end{array}$$

(b) scattered at cylinder 2

図-3.20 円柱1、2での散乱

のように表す。

円柱 Γ_1 へ ϕ_0^1 が入射してきたときの散乱波が ϕ_1^1 であるから境界条件 (3-41) は

$$\left. \frac{\partial(\phi_0^1 + \phi_1^1)}{\partial r_1} \right|_{r_1=R_1} = 0 \quad (3-61)$$

となり、 ϕ_1^1 が求められる。円柱1、2の半径をそれぞれ R_1 、 R_2 とする。以下同様にして j 回目の散乱波の係数は

$$\alpha_{j,n} = - \frac{\beta_{j,n} \frac{\partial}{\partial r_1} H_n^{(2)}(kr_2) \cos(n\theta_2)}{\frac{\partial}{\partial r_1} H_n^{(2)}(kr_1) \cos(n\theta_1)} \bigg|_{r_1=R_1}$$

$$= \beta_{j,n} \frac{-n \sin(n\theta_2) H_n^{(2)}(kr_2) \frac{\partial \theta_2}{\partial r_1} + k \cos(n\theta_2) \left\{ \frac{n}{kr_2} H_n^{(2)}(kr_2) - H_{n+1}^{(2)}(kr_2) \right\} \frac{\partial r_2}{\partial r_1}}{k \cos(n\theta_1) \left\{ \frac{n}{kr_1} H_n^{(2)}(kr_1) - H_{n+1}^{(2)}(kr_1) \right\}} \bigg|_{r_1=R_1}$$

(3-62)

$$\beta_{j,n} = - \frac{\alpha_{j,n} \frac{\partial}{\partial r_2} H_n^{(2)}(kr_1) \cos(n\theta_1)}{\frac{\partial}{\partial r_2} H_n^{(2)}(kr_2) \cos(n\theta_2)} \Bigg|_{r_2=R_2}$$

$$= \alpha_{j-1,n} \frac{-n \sin(n\theta_1) H_n^{(2)}(kr_1) \frac{\partial \theta_1}{\partial r_2} + k \cos(n\theta_1) \left\{ \frac{n}{kr_1} H_n^{(2)}(kr_1) - H_{n+1}^{(2)}(kr_1) \right\} \frac{\partial r_1}{\partial r_2}}{k \cos(n\theta_2) \left\{ \frac{n}{kr_2} H_n^{(2)}(kr_2) - H_{n+1}^{(2)}(kr_2) \right\}} \Bigg|_{r_2=R_2}$$

(3-63)

となる。従つて求めるポテンシャルは

$$\phi(r, \theta) = \phi_0^1 + (\phi_1^1 + \phi_1^2 + \phi_2^2 + \phi_2^1 + \phi_3^1 + \phi_3^2 + \phi_4^2 + \phi_4^1 + \phi_5^1 + \phi_5^2 + \dots) \quad (3-64)$$

座標関係は

$$r_1 \cos \theta_1 = r_2 \cos \theta_2$$

$$r_1 \sin \theta_1 = r_2 \sin \theta_2 - P_{12}$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial r_1} = \frac{r_1 + P_{12} \sin \theta_1}{\sqrt{(r_1 \cos \theta_1)^2 + (r_1 \sin \theta_1 + P_{12})^2}}$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial r_1} = \frac{-P_{12} \cos \theta_1}{(r_1 \cos \theta_1)^2 + (r_1 \sin \theta_1 + P_{12})^2}$$

$$\frac{\partial r_1}{\partial r_2} = \frac{r_2 - P_{12} \sin \theta_2}{\sqrt{(r_2 \sin \theta_2 - P_{12})^2 + (r_2 \cos \theta_2)^2}}$$

(3-65)

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial r_2} = \frac{P_{12} \cos \theta_2}{(r_2 \sin \theta_2 - P_{12})^2 + (r_2 \cos \theta_2)^2}$$

P_{12} は円柱 Γ_1 と円柱 Γ_2 との中心間距離である。

3. 5. 7 円柱3本の場合¹¹⁾

座標系は図-3. 21のようにとる。

入射波が最初にどの円柱に入射するかによって分類し、図-3. 22 a、b、cのように各円柱毎に散乱経路を考え、3. 5. 6と同様にして、各散乱波のポテンシャルの合計としてポテンシャルを求める。

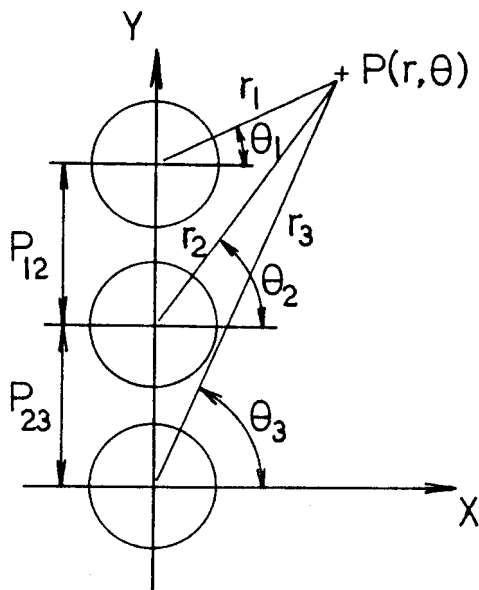


図-3. 21 座標系 (円柱3本)

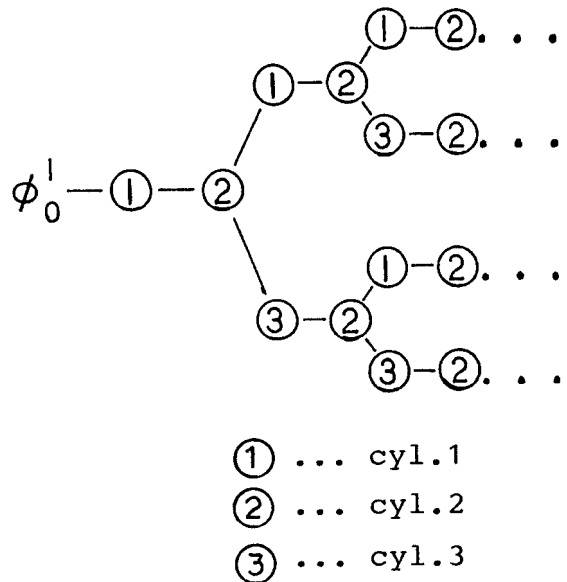


図-3. 22 a 円柱1からの散乱経路

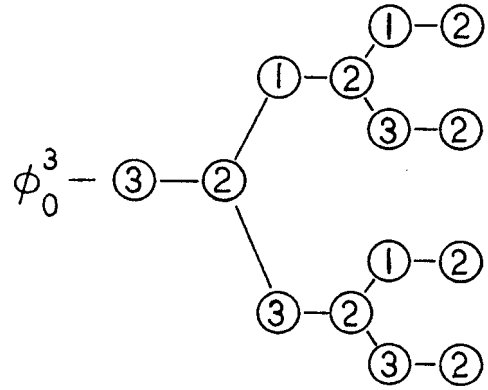
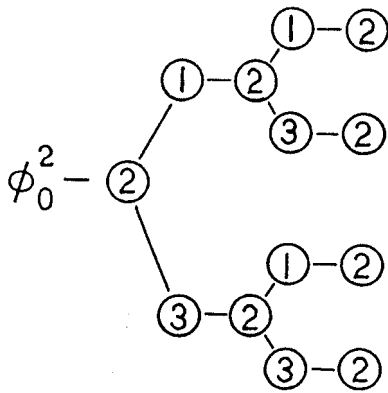


図-3.22b 円柱2からの散乱経路

図-3.22c 円柱3からの散乱経路

図-3.21から以下の関係がある。

$$r_1 \cos \theta_1 = r_2 \cos \theta_2 = r_3 \cos \theta_3$$

$$r_1 \sin \theta_1 = r_2 \sin \theta_2 - P_{12} = r_3 \sin \theta_3 - (P_{12} + P_{23})$$

$$\frac{\partial r_1}{\partial r_2} = \frac{r_2 - P_{12} \sin \theta_2}{\sqrt{(r_2 \sin \theta_2 - P_{12})^2 + (r_2 \cos \theta_2)^2}}$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial r_2} = \frac{P_{12} \cos \theta_2}{(r_2 \sin \theta_2 - P_{12})^2 + (r_2 \cos \theta_2)^2}$$

$$\frac{\partial r_3}{\partial r_2} = \frac{r_2 + P_{23} \sin \theta_2}{\sqrt{(r_2 \cos \theta_2)^2 + (r_2 \sin \theta_2 + P_{23})^2}}$$

(3-66)

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial r_2} = \frac{-P_{23} \cos \theta_2}{(r_2 \cos \theta_2)^2 + (r_2 \sin \theta_2 + P_{23})^2}$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial r_1} = \frac{r_1 + P_{12} \sin \theta_1}{\sqrt{(r_1 \cos \theta_1)^2 + (r_1 \sin \theta_1 + P_{12})^2}}$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial r_1} = \frac{-P_{12} \cos \theta_1}{(r_1 \cos \theta_1)^2 + (r_1 \sin \theta_1 + P_{12})^2}$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial r_3} = \frac{r_3 - P_{23} \sin \theta_2}{\sqrt{(r_3 \cos \theta_3)^2 + (r_3 \sin \theta_3 - P_{23})^2}}$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial r_3} = \frac{P_{23} \cos \theta_2}{(r_3 \cos \theta_3)^2 + (r_3 \sin \theta_3 - P_{23})^2}$$

3. 5. 8 直線状に配列された多円柱による波の回折¹²⁾

座標系は図-3. 23のようにとる。円柱の番号付けも図-3. 23の通りである。

円柱からの回折波については、どの円柱から出てどの円柱に当たり回折するかを考える。

3. 5. 8. 1 入射波

円柱mにあたる入射波のポテンシャル ϕ_0^m を円柱mの中心を原点とする極座標 (r_m, θ_m) で表す。

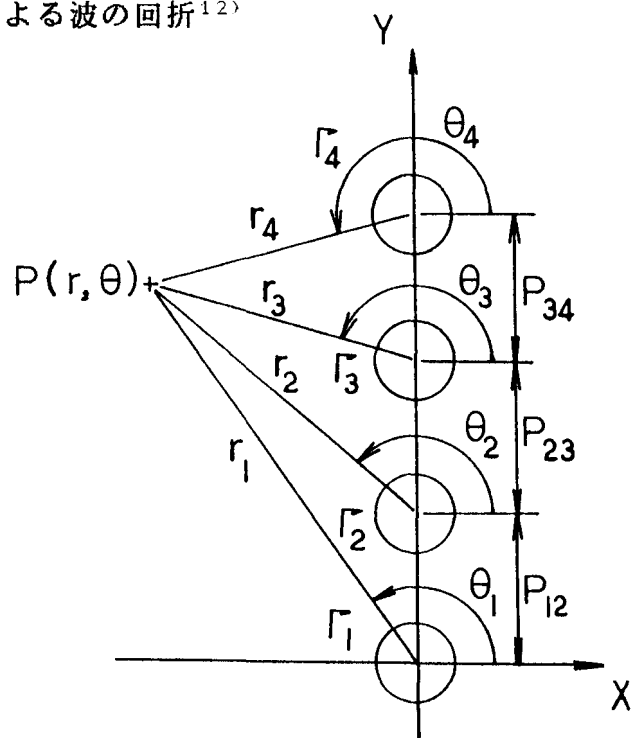


図-3. 23 座標系

$$\phi_0^m = \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(kr_m) \exp(in\theta_m)$$

$$= J_0(kr_m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n J_n(kr_m) \cos(n\theta_m)$$

ここで、 $m = 1, 2, \dots, N$ 。

N : 円柱の総本数。 $i = \sqrt{-1}$ 。

3.5.8.2 散乱波

最初に入射波が円柱番号1から N までのどの円柱にあたるかを区別するため、例として最初にあたる円柱を p とする。その波の散乱過程の例を図-3.24に示す。

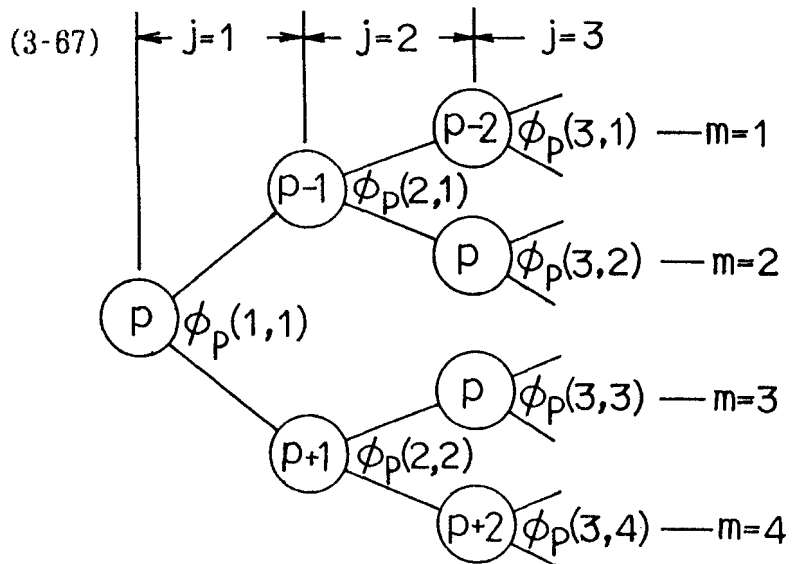


図-3.24 散乱過程

円柱 p にあたって発生する j 回目の散乱過程は一般に 2^{j-1} 個ある。それについてたとえば $j=3$ の場合は図-3.24のように m を用いて1から4まで区別する。考えている散乱波について、その散乱波がどの円柱から出た散乱波であるかを示す円柱番号を s とする。また考えている散乱波があたる円柱番号を b とする。たとえば図-3.24の中で円柱 $p+1$ から円柱 p へ散乱する場合、 $s = p+1$ 、 $b = p$ となる。

散乱波のポテンシャルは

$$\phi_s(j,m) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_{s,b}(j,n) H_n^{(2)}(kr_b) \cos(n\theta_b) \quad (3-68)$$

ただし、 r_b 、 θ_b は円柱 b を中心とする極座標 (r_b, θ_b) の成分。

最初にあたる円柱が p で、 j 回目の散乱波の内、 m 番目の散乱波 $\phi_p(j,m)$ を求めるには (3-68) 式より $n=0$ から ∞ 回足し合わせなければならないが、 $\phi_p(j,m)$ の

絶対値が 10^{-8} 以上で不変となった段階で以降の散乱波の影響は小さいと考え $\phi_p(j, m)$ の収束値とした。以下この値 10^{-8} を精度と呼ぶ。ただし繰り返し回数が小さい段階でまたま精度内に入る可能性もあるので、 n の最低値として $n_{min} = 3$ としている。

(3-68) 式の係数 $\alpha_b(j, n)$ は次式で求められる。

$$\alpha_b(j, n) =$$

$$-\alpha_a(j-1, n) \frac{-H_n^{(2)}(kr_a) n \sin(n\theta_a) \frac{\partial \theta_a}{\partial r_b} + \cos(n\theta_a) k \left\{ \frac{n}{kr_a} H_n^{(2)}(kr_a) - H_{n+1}^{(2)}(kr_a) \right\} \frac{\partial r_a}{\partial r_b}}{k \cos(n\theta_b) \left\{ \frac{n}{kr_b} H_n^{(2)}(kr_b) - H_{n+1}^{(2)}(kr_b) \right\}} \Bigg|_{r_b=R_b} \quad (3-69)$$

ただし、 r_a 、 θ_a は円柱 s を中心とする極座標 (r_a, θ_a) の成分。円柱境界上での値については以下のような表し方をする。

$$r_a \Big|_{r_b=R_b} : \text{境界円柱 } b \text{ の境界上 } (r_b=R_b) \text{ での } r_a \text{ の値。}$$

また、座標関係は

$$r_a^2 = \frac{r_b \pm P_{ab} \sin \theta_b}{\sqrt{(r_b \cos \theta_b)^2 + (r_b \sin \theta_b)^2}} \quad \begin{array}{ll} s > b & - \\ s < b & + \end{array}$$

$$\theta_a \Big|_{r_b=R_b} = \begin{array}{ll} \tan^{-1} \frac{R_b \sin \theta_b - P_{ab}}{R_b \cos \theta_b} & s > b \\ \tan^{-1} \frac{R_b \sin \theta_b + P_{ab}}{R_b \cos \theta_b} & s < b \end{array}$$

$$\frac{\partial r_a}{\partial r_b} = \frac{r_b \pm P_{ab} \sin \theta_b}{\sqrt{(r_b \cos \theta_b)^2 + (r_b \sin \theta_b \pm P_{ab})^2}} \quad \begin{array}{ll} s > b & - \\ s < b & + \end{array}$$

(3-70)

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial r_b} = \frac{\mp P_{sb} \cos \theta_b}{(r_b \cos \theta_b)^2 + (r_b \sin \theta_b \pm P_{sb})^2}$$

複号同順	$s > b$	下側符号
	$s < b$	上側符号

ただし、 P_{sb} は円柱 s と円柱 b の中心間距離。

従って求めるポテンシャルは

$$\phi = \phi_0^1 + \sum_{p=1}^N \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{m(j)} \phi_p(j, m) \quad (3-71)$$

ただし $m(j) = 2^{j-1}$ であるが、境界円柱番号 b や s は 1 以上でありかつ N 以下である。
 m がこの条件を満たさない場合は m として数えないものとする。

3.5.9 計算上の注意

計算は倍精度でおこなった。計算領域は x 方向約 7 波長、 y 方向約 9 波長としている。
 計算点は 50×50 分割、 100×100 分割にした。ポテンシャル値の収束は 10^{-5} より大きい部分で変化がなくなれば、その値を収束値とした。

Bessel 関数の計算は渡辺・名取等のプログラムを使用している。¹³⁾ Bessel 関数を計算する上で、円柱中心間距離が円柱直径の 3 倍程度以下になると波高分布が異常値をとるので、円柱中心間距離は直径の 3 倍以上としている。

3.6 ホログラム型円柱群の配列決定

ホログラフィ理論を基礎にした波浪制御構造物を以下ホログラム型波浪制御構造物という。この方法の特徴は波浪制御領域を任意に選べることであり、言い替えれば逆解析ができるということである。本論では簡単のため、波浪制御領域として円形島を考えている。

ホログラム型円柱群の配列決定には次の3段階がある。^{14), 15), 16)}

- 1) ホログラム波高の計算
- 2) ホログラム波高に等価な円柱杭群への変換
- 3) ホログラム波高に等価かどうかの確認

以下各段階ごとに説明する。

3.6.1 ホログラム波高の計算

波浪制御領域として円形島が1つの場合と2つの場合の例を考える。円形島が1つの場合は3.5.5で述べた円柱1本の場合に相当する。あるいは多円柱の場合の円柱本数1本の場合に相当する。

(3-48)式を使って円形島1つの場合の波高分布を計算する。水深としては3.5.2で述べたように施工性等を考えて10m程度とする。微小振幅波理論を適用すると、

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) \quad (3-71)$$

水深 $h = 10\text{ m}$ 、周期 $T = 4\text{ sec}$ のときの波長 L を (3-71) 式から求めた $L = 24.652\text{ m}$ を計算に使用する。図-3.25は同一波長 ($L = 24.652\text{ m}$) の入射波に対し、円形島の直径を 100 m (図-3.25 a)、 50 m (同 b)、 20 m (同 c) の3種類にかえて、円形島の中心から距離 $l = 103.5\text{ m}$ 離れたところに観測線を考えそこでの波高分布を示している。これらの波高分布を使ってホログラム型の波浪制御構造物を考えると、これらの波高分布が光ホログラフィというホログラムに相当するので以下ホログラム波高と呼ぶ。

また図-3.26の方は円形島の直径が 100 m の場合に、島中心から観測線までの距

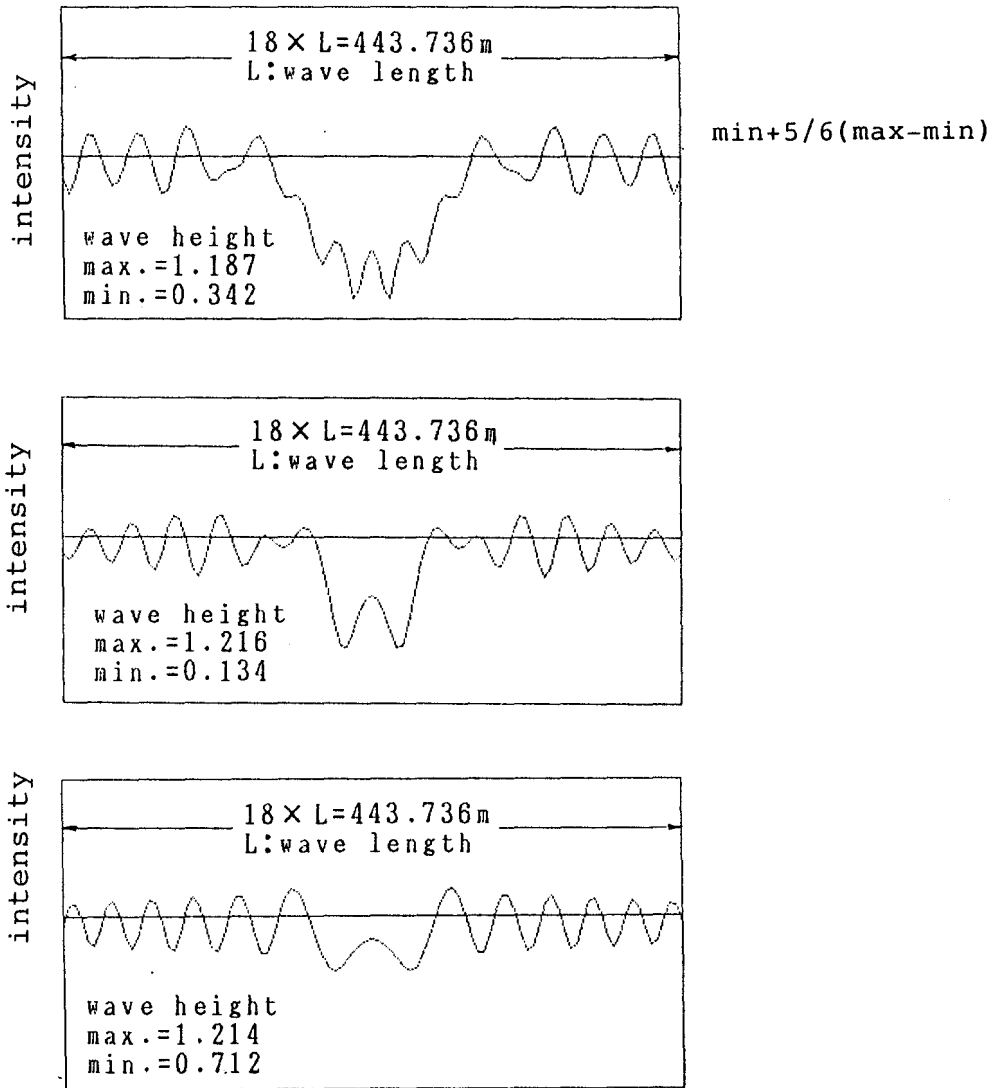
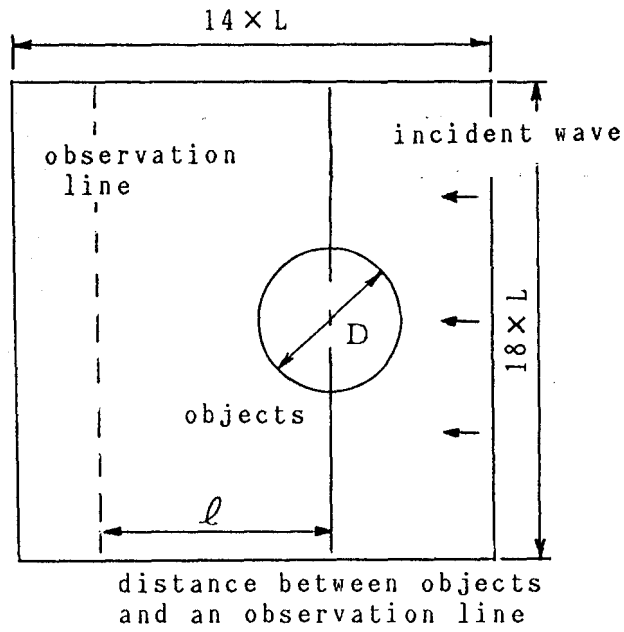


図-3.25 円形島の直径を変化させた場合の円形島1個の場合のホログラム波高の変化

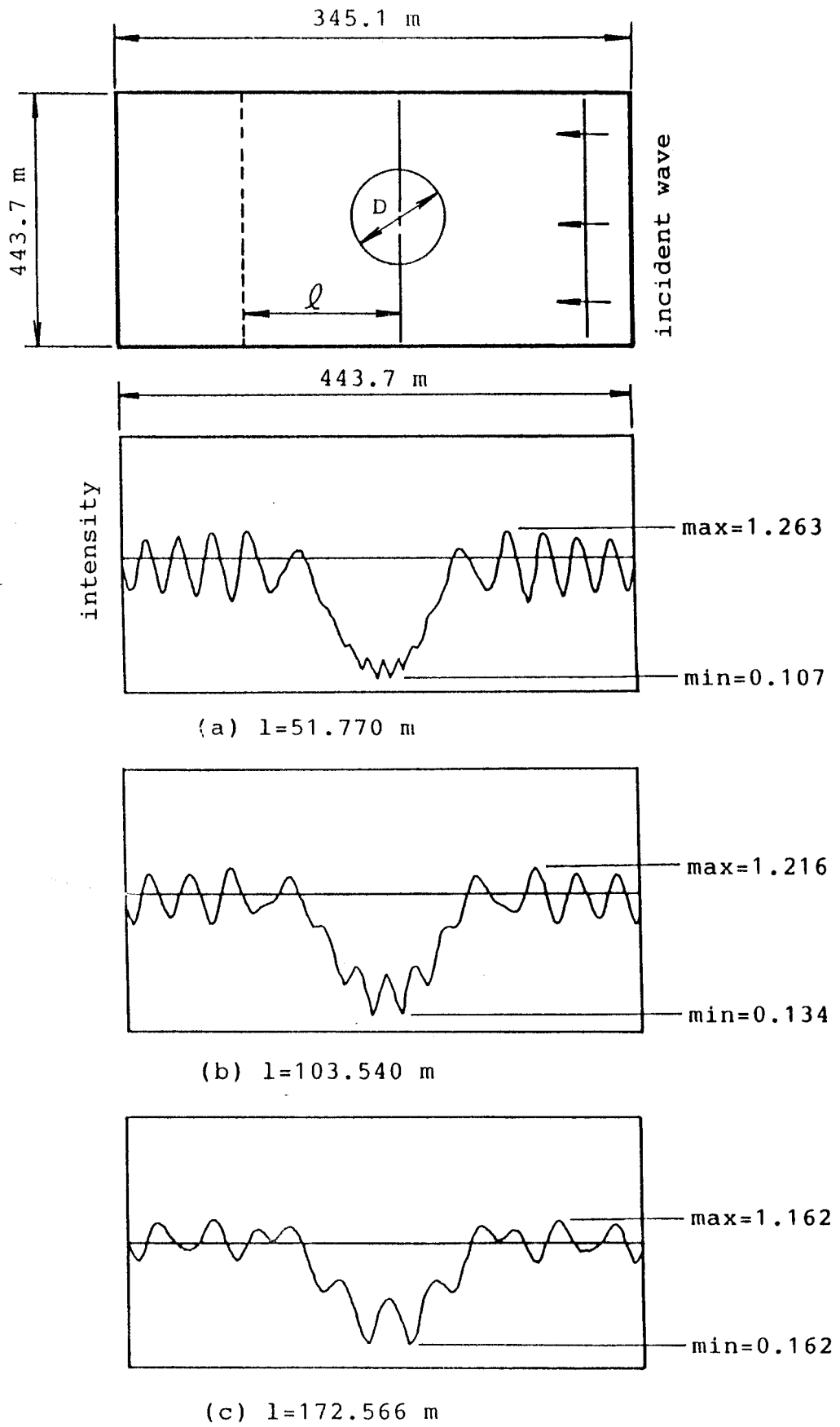


図-3.26 観測線までの距離 l の変化に対する円形島 (直径 100 m) 1 個の場合のホログラム波高の変化

離 l が 172.6 m、103.5 m、51.7 m の各場合の波高分布を示す。

また円形島が2つの場合のホログラム波高を計算したのが図-3.27である。2つの円形島ともに直径は100 mで同じである。円形島の中心と観測線との距離 l は332.806 mである。島堤中心間距離 P_{12} は690.264 mである。図中大きい谷が2箇所あるのがそれぞれの円形島に対応した波高低下領域である。円形島数が2つ以上になっても同様に波高計算をすればよい。

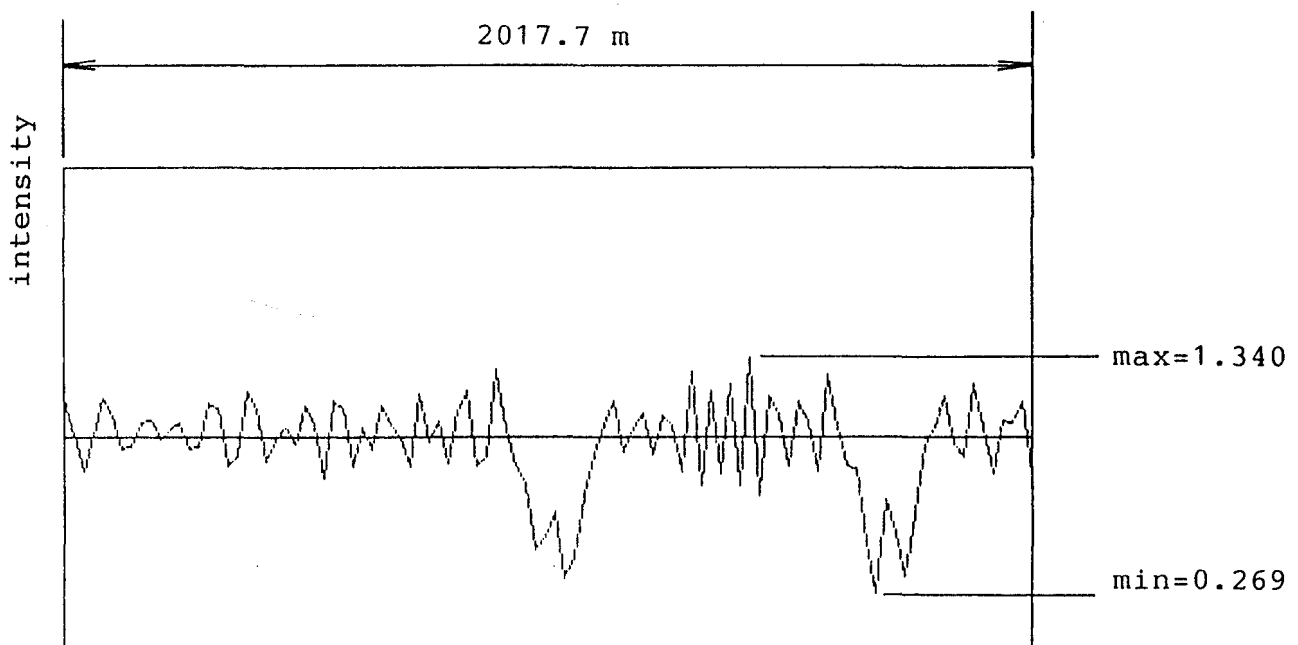
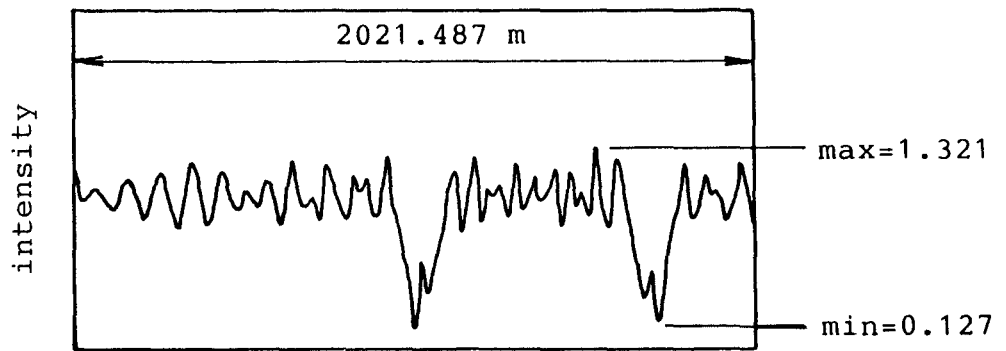
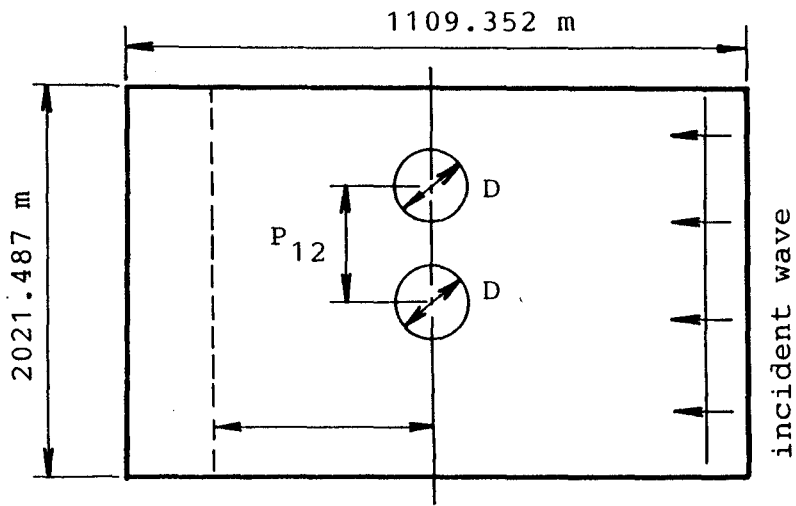


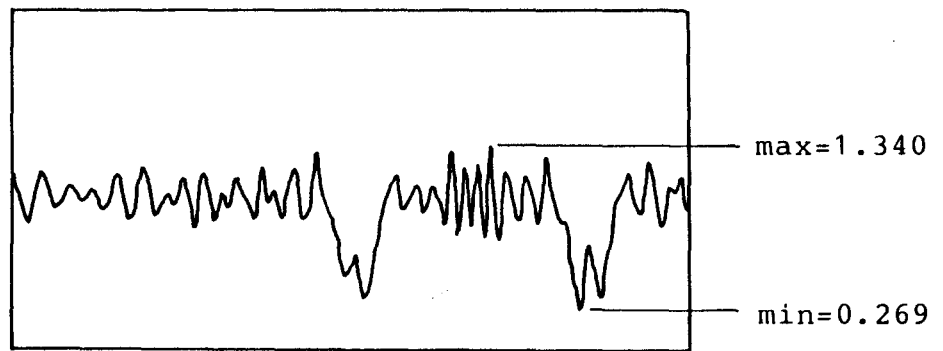
図-3.27 円形島2個の場合のホログラム波高

$$(D_1 = D_2 = 100\text{m}, l = 332.806\text{m})$$

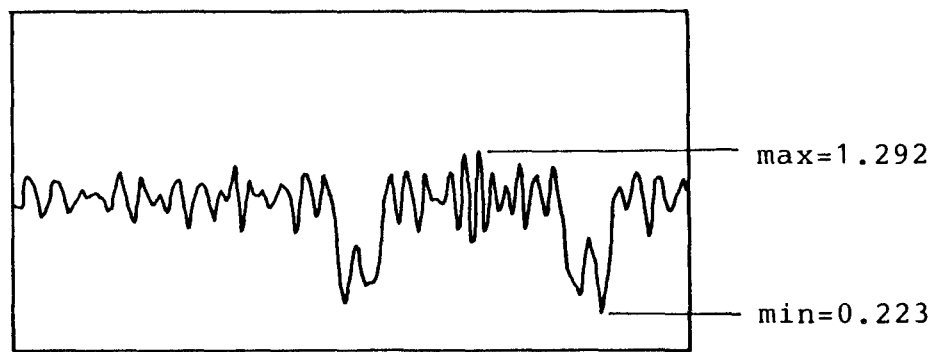
$$(P_{12} = 690.264\text{m})$$



(a) $D_1=D_2=100$ m, $l=221.870$ m



(b) $D_1=D_2=100$ m, $l=332.806$ m



(c) $D_1=D_2=100$ m, $l=443.741$ m

図-3. 28 観測線までの距離 l を変えたときの円形島 2 個の場合のホログラム波高の変化 ($P_{12}=690.264$ m)

図-3.2で説明したように、インラインホログラフィではホログラム作成に際し物体は半透明であり、入射光は物体を透過して物体光と合成されホログラムに記録された。水面波の場合に対しては散乱波に入射波のポテンシャルを重ね合わせて考えていた。数値計算ホログラフィのところでは入射光のポテンシャルを数値的に足し合わせた。水面波ホログラフィの計算でも、入射波のポテンシャルを足し合わせていて半透明の条件は満たしているとも考えられるが、半透明の条件が強く満たされる場合として、さらに入射波のポテンシャルを加え合わせることも考えられる。入射波のポテンシャル ϕ は式(3-50)から

$$\phi(x, y) = \exp(ikx) \quad (3-72)$$

このx軸の負の方向に進む波のポテンシャルを円柱1本の場合に求められるポテンシャルに足し合わせる。そうして求めた合成波のポテンシャルから式(3-48)を使って波高を計算する。この波高分布をホログラム波高と考えることができる。このホログラム波高を種々の観測位置(1=138.053 m、103.540 m、69.026 m、51.770 m)に対して表示したのが図-3.29である。

3.6.2 ホログラム波高に等価な円柱杭群への変換

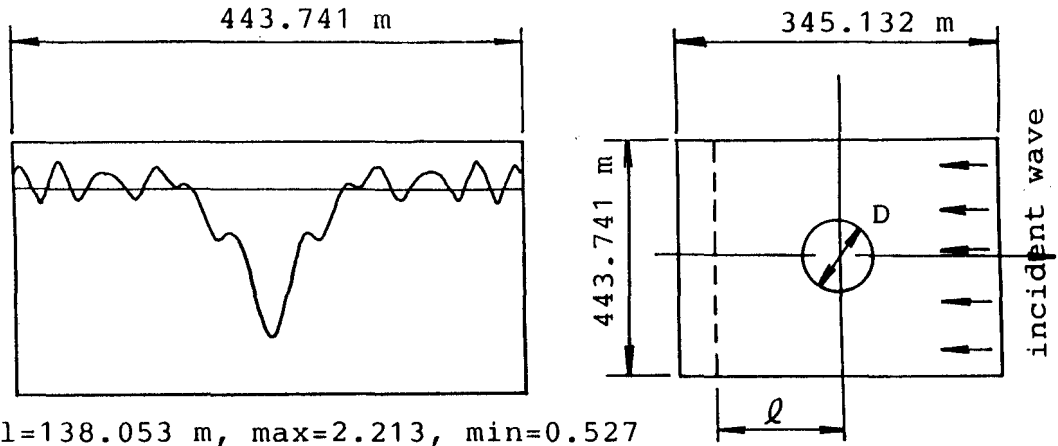
3.6.2.1 円柱群の配列

ホログラフィでは感光フィルムに光の強度分布を濃淡の縞模様として記録する。この縞模様を記録したものをホログラムといい複素振幅透過率を呈するように、水の波の場合には波高の大小が波の透過率を決定するというように理解する。

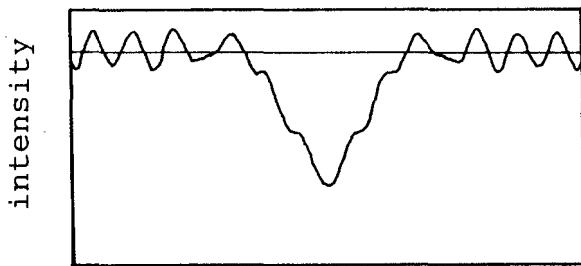
ホログラフィでの光の強度分布に相当するのが水面波の波高分布である。以下この波高をホログラム波高と呼ぶ。したがって、ホログラフィ理論を応用して円柱群の配列の粗密を決めるのに次のようなA、B2種類の考え方をする。

A：波高の高い部分は波が透過しにくいと考え円柱を密に配列し、逆に波高の低い部分は波をよく透過すると考え円柱を粗に配列する。

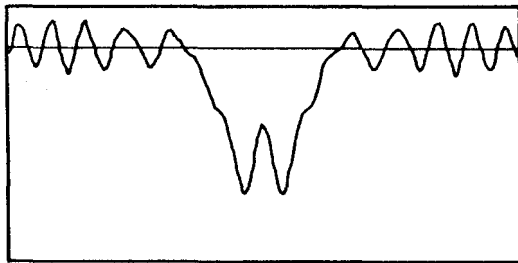
B：Aとは逆の場合で波高の高い部分は波をよく透過すると考え円柱を粗に配列し、波高の低い部分は波を透過しにくいと考え円柱を密に配列する。



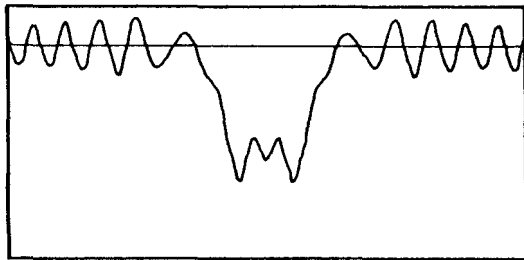
(a) $l=138.053$ m, $\max=2.213$, $\min=0.527$



(b) $l=103.540$ m, $\max=2.216$, $\min=0.727$



(c) $l=69.026$ m, $\max=2.248$, $\min=0.645$



(d) $l=51.770$ m, $\max=2.262$, $\min=0.740$

図-3. 29 観測線までの距離 l を変えたときの円形島1個の場合のホログラム波高の変化 (入射波と回折波のポテンシャルを足した場合)

3.6.2.2 使用するホログラム波高の幅

光ホログラフィの場合に必要なホログラム幅については計算機ホログラフィの検討のところで述べた。ここでは水面波の場合のホログラム波高として広い範囲の波高分布を用いる場合（a）と、狭い範囲の波高分布を用いる場合（b）の2種類を考える。

a：広い範囲の波高分布を用いる。

b：狭い範囲の波高分布を用いる。

3.6.2.3 使用円柱径

ホログラム型波浪制御構造物をつくる円柱杭の直径を同一にするかしないかによっても波浪制御状況は変わってくるであろう。

使用円柱径が同一か同一でないかの区別を次のようにする。

α ：使用する円柱径は同一である。

β ：使用する円柱径は同一である。

3.6.2.4 配列例

ここでは次のことについて検討したいので、以下の各項目に沿った配列例を示す。

- 1) AかBの配列のどちらが適当か。
- 2) aとbのどちらが妥当か、あるいはどの程度の幅が必要か。
- 3) ホログラム波高の位置は島からどの程度の距離離れた場所が適当か。
- 4) 島直径と波長の関係がどう再生に影響するか。
- 5) 使用円柱径を変えるとどう再生に影響するか。
- 6) 入射波のポテンシャルをさらに加えてホログラム波高を計算した場合。
- 7) 島堤が2箇所にある場合。

以下に検討例の一覧を表-3.4に示した。

まず基準波高値の設定について説明する。

3.6.1で述べた波高が高い、低いという判定は相対的なものだから基準を選び、その基準から高い、低いと言わねばならない。この基準としては平均波高値、最大波高値、最小波高値などを使って選ぶことができる。基準波高値として最大波高値と最小波高値の差の5/6倍、4/6倍、3/6倍、2/6倍を選び最低波高値に加える。これらの波高値を一例として図-3.30のホログラム波高図の中に横線で記入した。これらの横線で

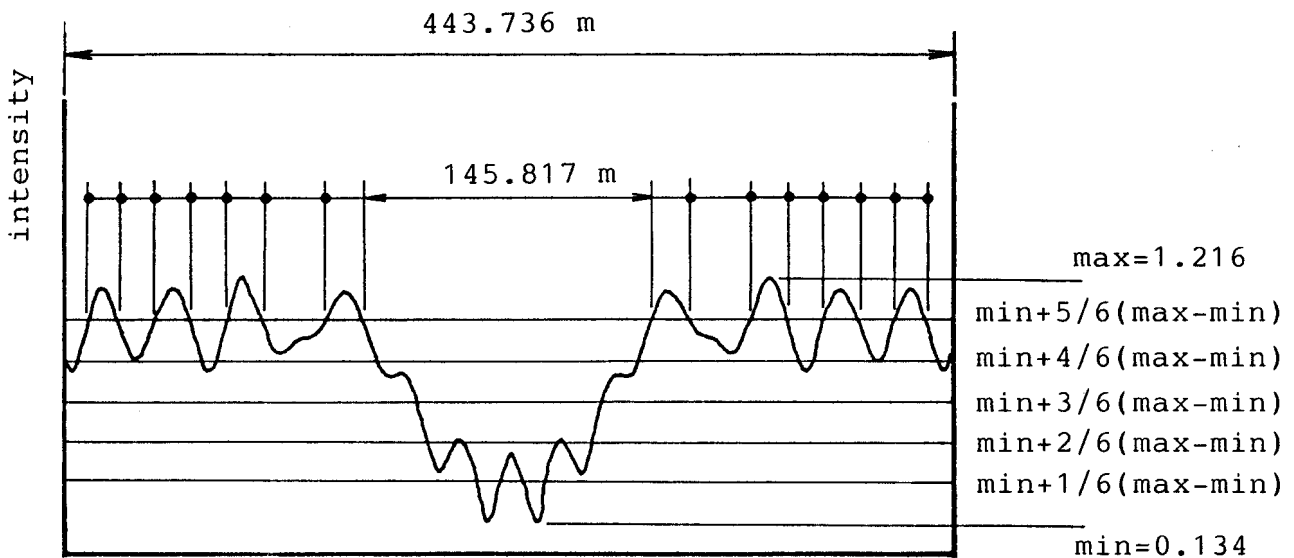


図-3.30 基準波高値 (島直径 $D=100\text{ m}$ 、 $l=103.540\text{ m}$)

区分される高い、低い領域は3つに分けられる場合とそれ以上に分けられる場合がある。3/6倍に基準を選べば3つに区分され、他の場合は3つ以上に区分される。いまプログラム波高をプログラム型の円柱杭群に変換しようとしているのだから細かく変換できる方が望ましい。つまり基準波高値より高い、あるいは低い部分が細かく、あるいは多く分けられる分け方が望ましい。したがって図-3.30からわかるように、基準波高値を最大波高値と最小波高値の差の5/6倍にとりプログラム型円柱杭群に変換する。

1) について検討する。

上で述べた配列決定の仕方のうち、1)で述べたAかBのどちらがよいかを調べてみた。プログラム波高の低い中央部分に対して円柱を置かない配列はA-a- α 型である。この配列例を図-3.31に示す。円柱間隔を表-3.5に示す。これとは逆にプログラム波高の低い中央部分に対して、周囲のプログラム波高の高い部分に比べて円柱をより密に配置させる考え方はB-a- α 型である。この配列例を図-3.32に、円柱間隔を表-3.6に示す。

ただこの例でわかるように基準波高値より低い部分として中央に広い部分ができる。この中央部分に円柱を配列させる場合、この部分の取扱い方は左右の低波高部分の円柱配列

よりもより密に配列させるべきであろうことを示すために図-3.33のような配列例を検討する。これは周囲の円柱配列は図-3.32と同じであるのだが、中央部分については透過波高をより小さくさせるために円柱中心間距離を図-3.32の半分にして円柱を図-3.32に比べて密に配列させた例である(図-3.33)。

図-3.33の場合の最小円柱中心間距離が8.875mに対し、さらに半分の4.437mとして狭くした配列を考えたのが図-3.34である。使用する円柱間隔はいくら小さくてもよいのだが、級数展開による理論解を求める場合はあまり小さくできない。この理由によってこの検討例は理論解は求められないので、ポテンシャルの重ね合わせ手法のみで検討している。

表-3.4 検討例一覧

検討 ケース	再生 領域 (島径)	円柱 配列 型	円柱配列例 (円柱本数)	再生例 使用円柱径(m) 最小円柱間隔 P_{min}	計算分割幅m	
					Δx	Δy
1)	D=150m l=103. 540m	A-a- α	図-3.31 (26本)	図-3.67 重ね (4m) $P_{min}=4.920m$	6.903	8.875
				図-3.68 厳密 (4m) $P_{min}=4.920m$	3.451	5.177
	D=100m	B-a- α	図-3.32 (21本) 図-3.33 (25本)	図-3.69 重ね (12.326m) $P_{min}=4.674m$	6.903	8.875
				図-3.70 厳密 (4m) $P_{min}=13.750m$ 図-3.71 重ね (12.326m) $P_{min}=0 m$	3.451	4.437
l=103. 540m	B-a- α	図-3.33 (25本) 図-3.34 (45本)	図-3.72 厳密 (4m) $P_{min}=4.875m$	6.903	8.875	
			図-3.73 重ね (4m) $P_{min}=0.437m$	3.451	4.437	
2)	D=150m l=103. 540m	B-b- α	図-3.35 (12本)	図-3.74 重ね (4m) $P_{min}=0.984m$	6.903	8.875
				図-3.75 厳密 (4m) $P_{min}=0.984m$	3.451	8.254

3)	D=100m l=172. 566m	B - a - α	図-3.36 (24本)			
4)	D=20m l=103. 540m	B - a - α	図-3.37 (37本)	図-3.76 重ね (4m) $P_{min}=0.437m$	13.805	4.437
	D=100m l=103. 540m	B - a - α	図-3.32 (21本)	図-3.77 重ね (12.326m) $P_{min}=4.674m$ 図-3.78 重ね (12.326m) $P_{min}=4.674m$	6.903 6.903	8.875 8.875
7)	D=100m ×2個 $P_{12}=6$ 90.264 m l=332. 806m	B - a - α	図-3.42 (40本)	図-3.79 厳密 (4m) $P_{min}=6.000m$	9.861	11.340
	D=100m l=103. 540m	B - a - α	(9本)	図-3.80 厳密 (4m) $P_{min}=4.875m$	3.451	4.437
6)	D=100m l=103. 540m	B - a - α	図-3.41 (31本)	図-3.81 厳密 (4m) $P_{min}=8.000m$	3.451	4.437

注意：重ね…ポテンシャル重ね合わせ解

厳密…厳密解

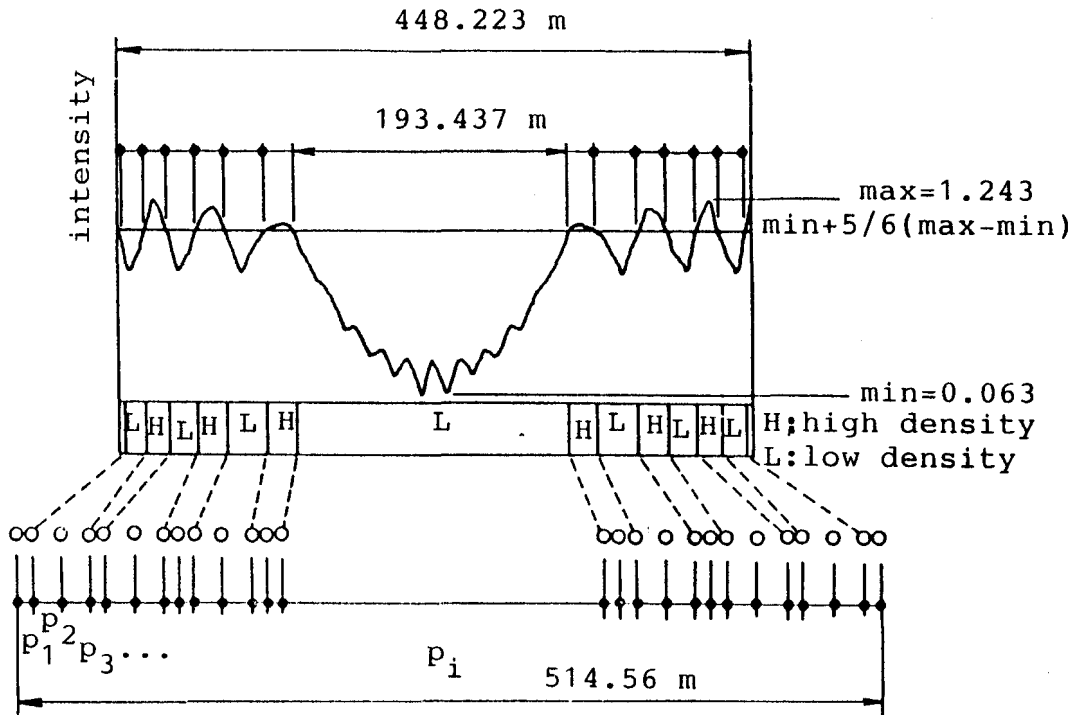


図-3.31 A-a- α 型のホログラム波高と円柱配列例 (円柱26本)
(島直径 $D=150$ m、 $l=103.540$ m)

表-3.5 円柱間隔 (図-3.31)

単位：m

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_i	8.920	17.840	17.840	8.920	17.840	17.840	8.920	8.920	17.840	17.840
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
p_i	8.920	8.920	193.44	8.920	8.920	17.840	17.840	8.920	8.920	17.840
i	21	22	23	24	25					
p_i	17.840	8.920	17.840	17.840	8.920					

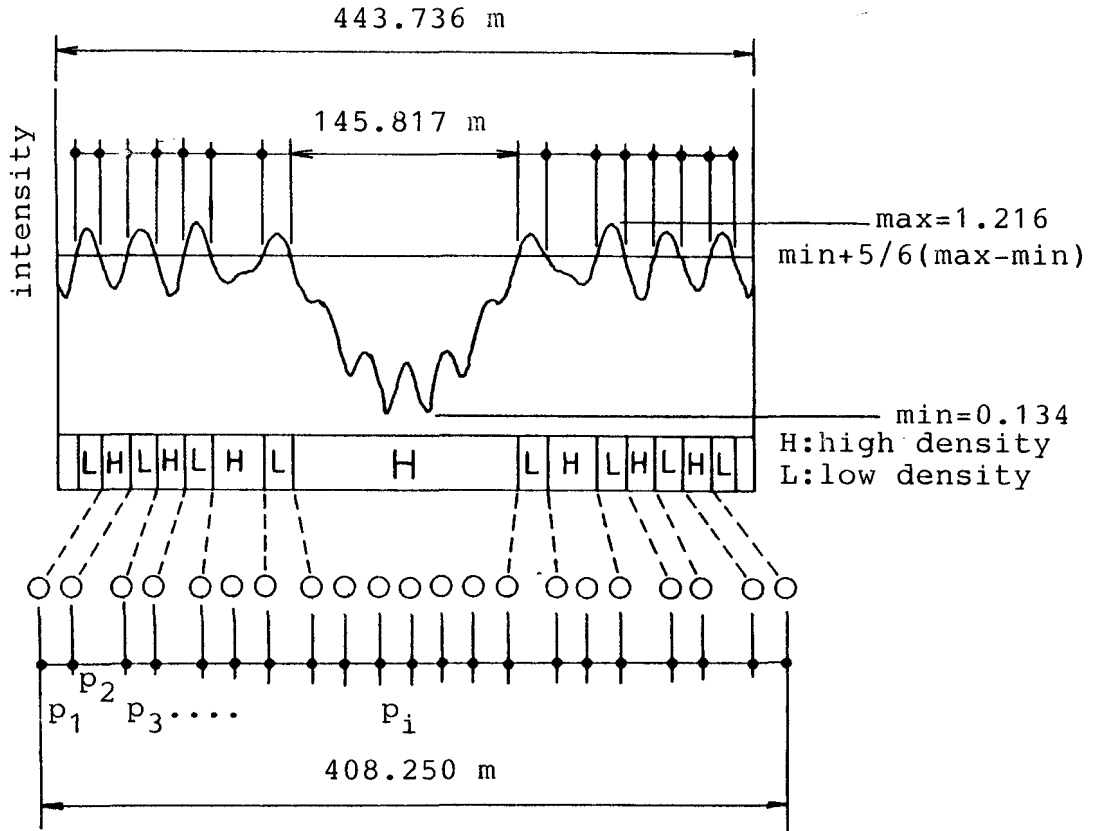


図-3.32 B-a- α 型のホログラム波高と円柱配列例 (円柱21本)
(島直径 $D=100$ m、 $l=103.540$ m)

表-3.6 円柱間隔 (図-3.32)

単位：m

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_i	17.750	26.625	17.750	26.625	17.750	17.750	26.625	17.750	17.750	17.750
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
p_i	17.750	17.750	17.750	26.625	17.750	17.750	26.625	17.750	26.625	17.750

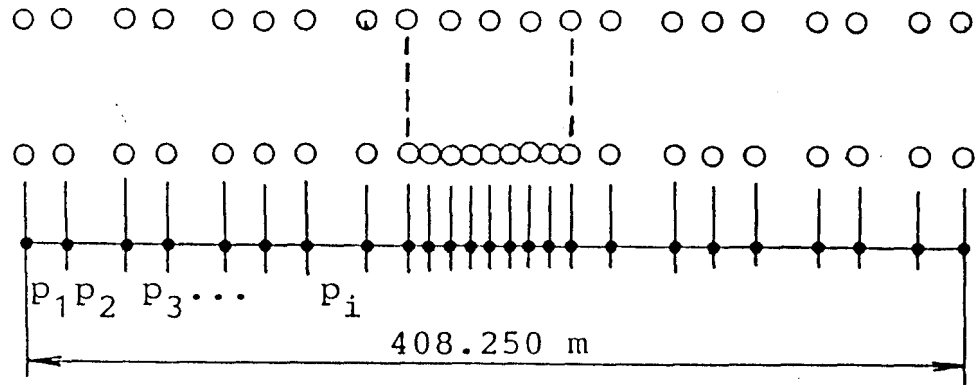


図-3.33 B-a-α型のホログラム波高と円柱配列例 (円柱25本)
(島直径D=100m、l=103.540m)

表-3.7 円柱間隔 (図-3.33)

単位：m

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p _i	17.750	26.625	17.750	26.625	17.750	17.750	26.625	17.750	8.875	8.875
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
p _i	8.875	8.875	8.875	8.875	8.875	8.875	17.750	26.625	17.750	17.750
i	21	22	23	24						
p _i	26.625	17.750	26.625	17.750						

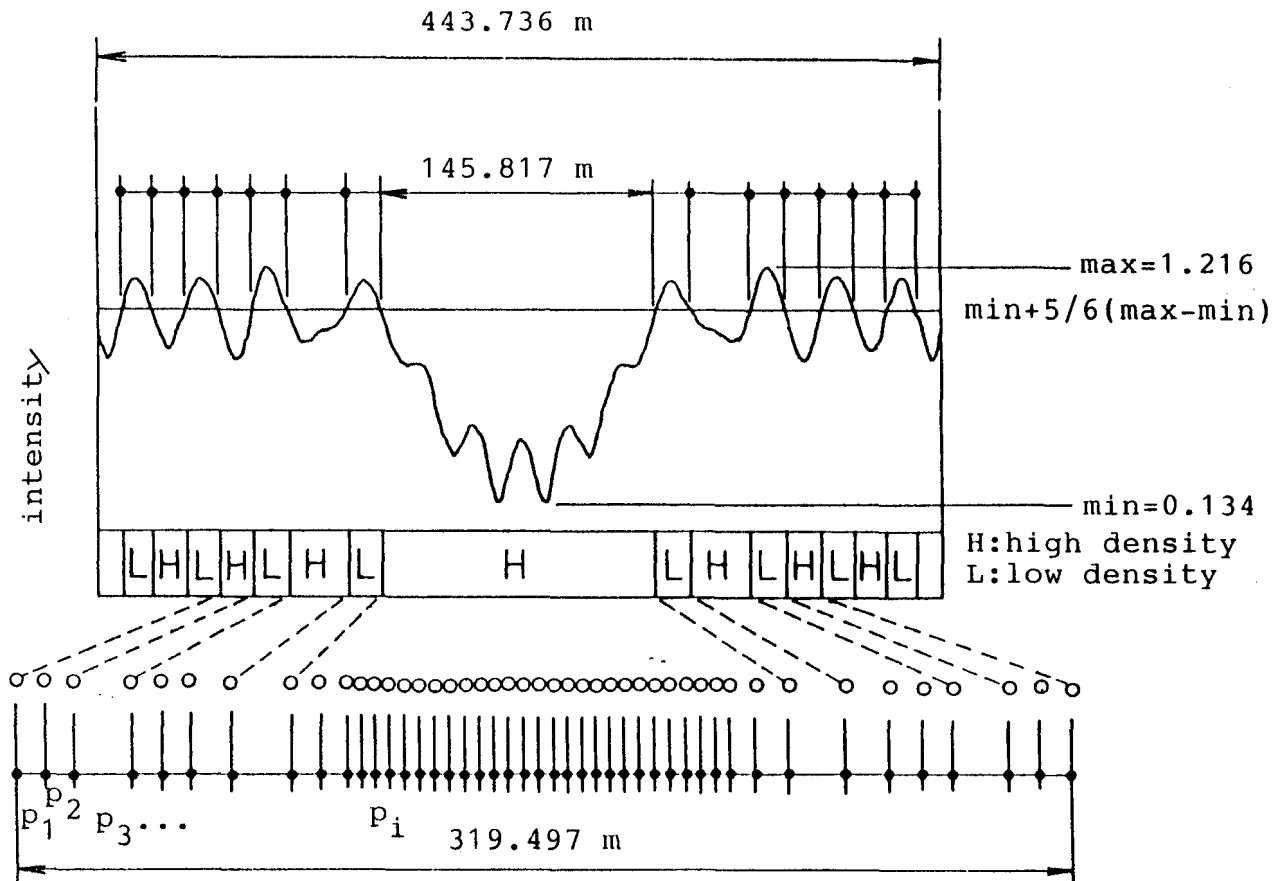


図-3.34 B-a- α 型のパログラム波高と円柱配列例 (円柱45本)
(島直径D=100m、 $l=103.540$ m)

表-3.8 円柱間隔 (図-3.34)

単位: m

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_i	8.874	8.874	17.748	8.874	8.874	13.311	17.748	8.874	8.874	4.437
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
p_i	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437
i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
p_i	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437
i	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
p_i	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	8.874	8.874	17.748	13.311	8.874
i	41	42	43	44						
p_i	8.874	17.748	8.874	8.874						

2) について検討する。

使用するホログラム波高の範囲が狭い例として図-3.35を考える。これはホログラム波高の低い中央部分のみに着目している。基準波高値として最小波高値に最大波高値と最小波高値の差の0.12倍を加えた値を用いた。基準波高値より高い部分は良く波を透過させると考えて円柱を配列させない。したがって円柱を配列させるためのホログラム波高の使用幅は60.6mと小さく全体幅448.2mの約1/7倍になっている。

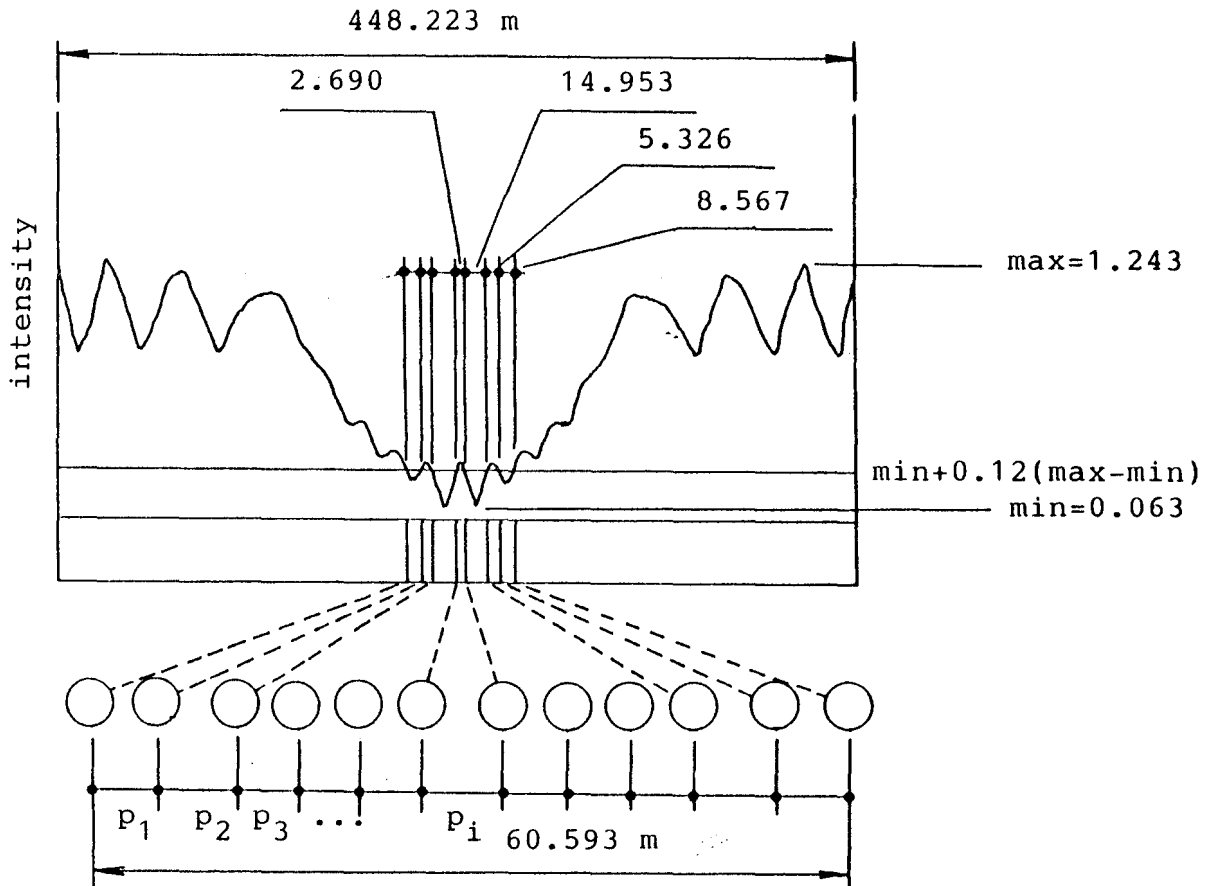


図-3.35 B-b- α 型のホログラム波高と円柱配列例 (円柱12本)
(島直径 $D=150$ m、 $l=103.540$ m)

表-3.9 円柱間隔 (図-3.35)

単位: m

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_i	5.500	6.500	4.984	4.984	4.984	5.689	4.984	4.984	4.984	6.500
i	11									
p_i	5.500									

3) について検討する。

ホログラム波高を計算する位置としての l (図-3.26 参照) を図-3.26 の $l = 103.5\text{ m}$ より大きく $l = 172.566\text{ m}$ にとって円柱の配列例を示したのが図-3.36 である。

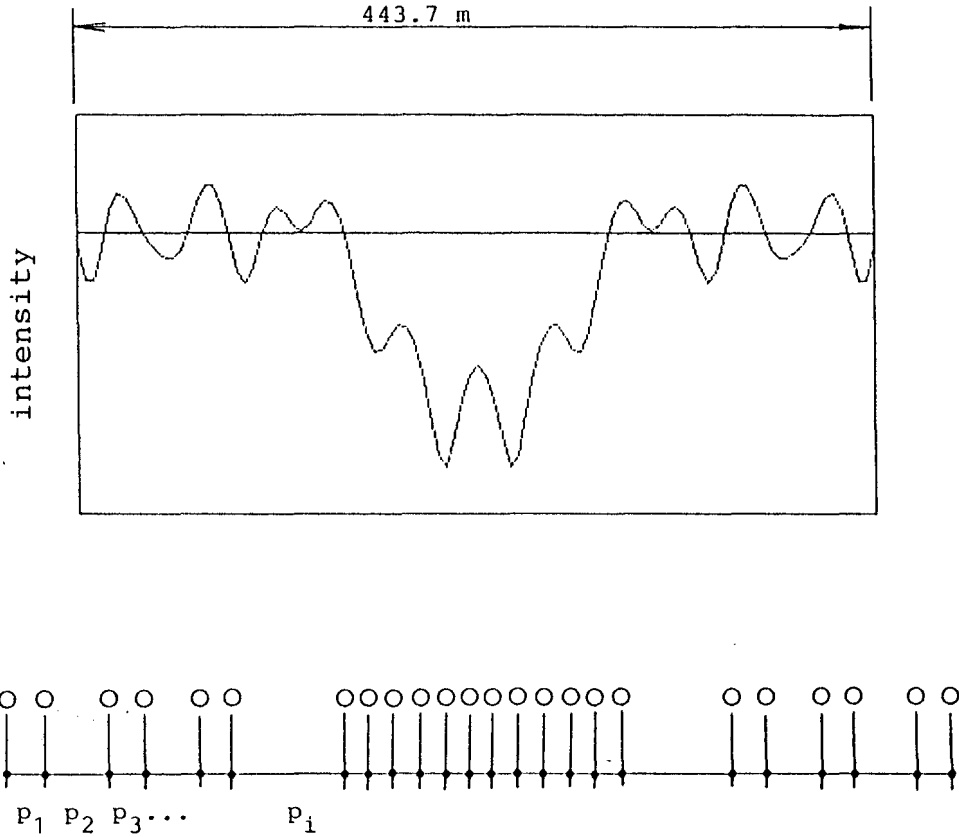


図-3.36 B-b- α 型ホログラム波高と円柱配列例 (円柱24本)
(島直径 $D = 150\text{ m}$ 、 $l = 172.566\text{ m}$)

表-3.10 円柱間隔 (図-3.36)

単位: m

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_i	16.000	30.014	16.000	25.801	16.000	53.009	12.000	12.000	12.000	12.000
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
p_i	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	53.009	16.000	25.801
i	21	22	23							
p_i	16.000	30.014	16.000							

4) について検討する。

波長と島直径の比が再生にどう影響を与えるかを調べた。図-3.32の直径100mに比べて1/5倍の20mの島直径にした場合のホログラム波高分布に対して円柱を配列させたのが図-3.37である。

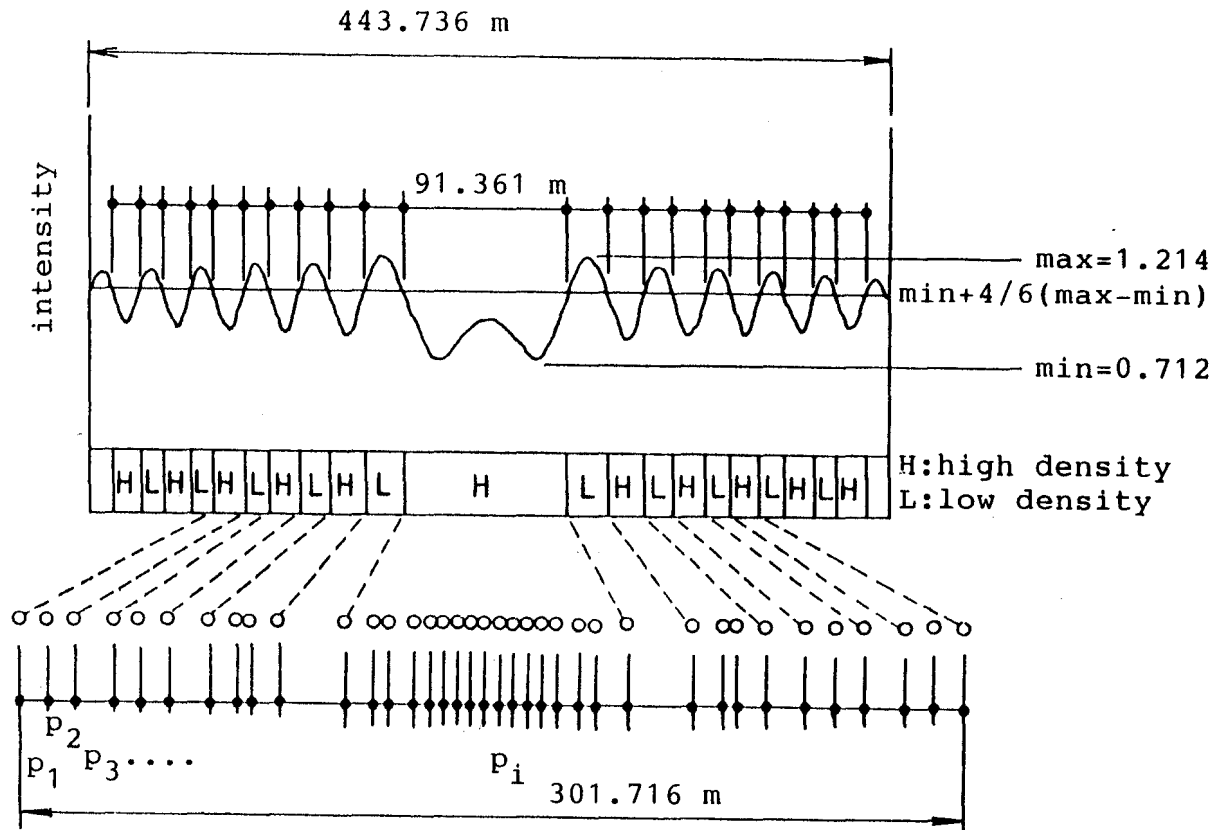


図-3.37 B-a-α型のホログラム波高と円柱配列例 (円柱37本)
(島直径D=20m、l=103.504m)

表-3.11 円柱間隔 (図-3.37)

単位: m

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p _i	8.874	8.874	13.311	8.874	8.874	13.311	8.874	4.437	8.874	22.185
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
p _i	8.874	4.437	8.874	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437	4.437
i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
p _i	4.437	4.437	4.437	8.874	4.437	8.874	22.185	8.874	4.437	8.874
i	31	32	33	34	35	36				
p _i	13.311	8.874	8.874	13.311	8.874	8.874				

5) について検討する。¹³⁾

ここでは円柱径を変えたら回折波領域にどう影響がでるかについて述べる。

図-3.38のように円柱3本 ($D_1=D_2=D_3=0.4\text{ m}$, $P_{12}=P_{23}=0.78\text{ m}$, $L=0.39\text{ m}$) の場合の円柱背後の波高が低い回折領域はカタカナのハの字状に広がった帯状の領域として計算される。この帯の幅は、円柱径が大きくなれば太くなる傾向にある。

図-3.39は中央の円柱径に比べて左右の円柱径を半分に小さくした場合の回折波領域の波高分布図である。図-3.40は中央の円柱径を左右の円柱径の半分にした場合である。

図-3.38のように円柱径が同じ場合には交差する帯は単に帯をそのまま重ねたと見てとれる。しかし図-3.39、3.40のように円柱径の大きい円柱と小さい円柱の組み合わせでは帯状の回折領域が波をうつように折れ曲がる。帯の重なりも円柱径の大きい円柱の回折領域の影響を強く受けるようである。

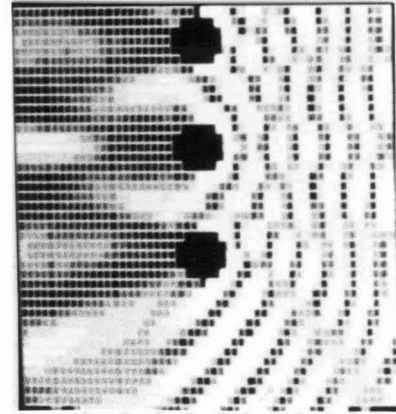


図-3.38 円柱3本の場合の回折領域
($D_1=D_2=D_3=0.4\text{ m}$, $P_{12}=P_{23}=0.39\text{ m}$, $L=0.39\text{ m}$)

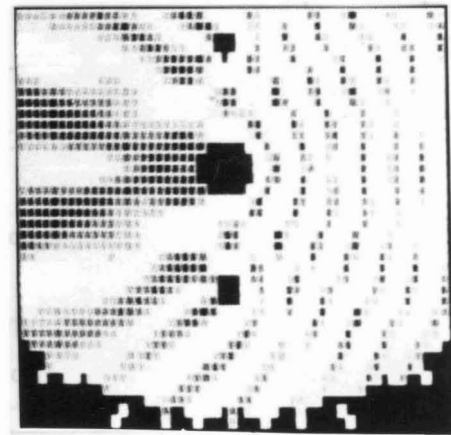


図-3.39 円柱3本の場合の回折領域
($D_1=D_3=0.2\text{ m}$, $D_2=0.4\text{ m}$, $P_{12}=P_{23}=0.39\text{ m}$, $L=0.39\text{ m}$)

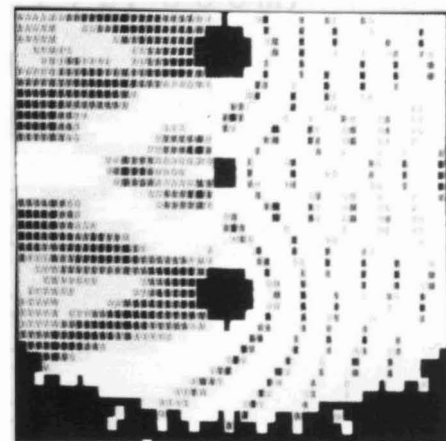


図-3.40 円柱3本の場合の回折領域
($D_1=D_3=0.4\text{ m}$, $D_2=0.2\text{ m}$, $P_{12}=P_{23}=0.39\text{ m}$, $L=0.39\text{ m}$)

6) について検討する。

インラインホログラフィの原理と同じくするために入射波のポテンシャルと回折波のポテンシャルを足し合わせるにより求めたホログラム波高に対しての円柱列群の配列を決定する。観測線上での最大波高値と最小波高値との差の5/6倍を最小波高値に加えて基準波高値とする。この基準波高値で上下に分けられた部分に対して円柱を割り振っていく。3.6.2.1で述べたB型の配列で考える。ホログラム波高値が低い部分には円柱を密に、逆に高い部分には粗に配列させる。この1例が図-3.41である。計算収束性を考えて最小円柱間隔を円柱直径の3倍 ($\Delta y \times 3 = 12.312 \text{ m}$) としている。円柱間隔を表-3.12に示す。この例はポテンシャルの重ね合わせ解と比較できるように円柱間隔は計算分割幅の整

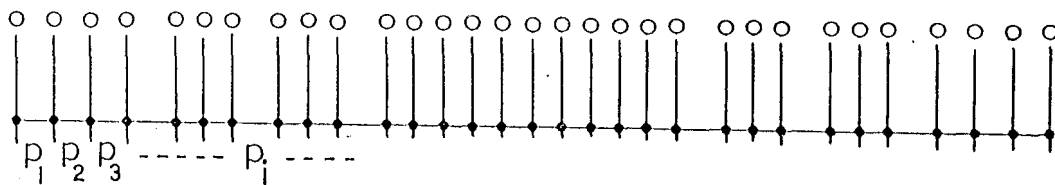
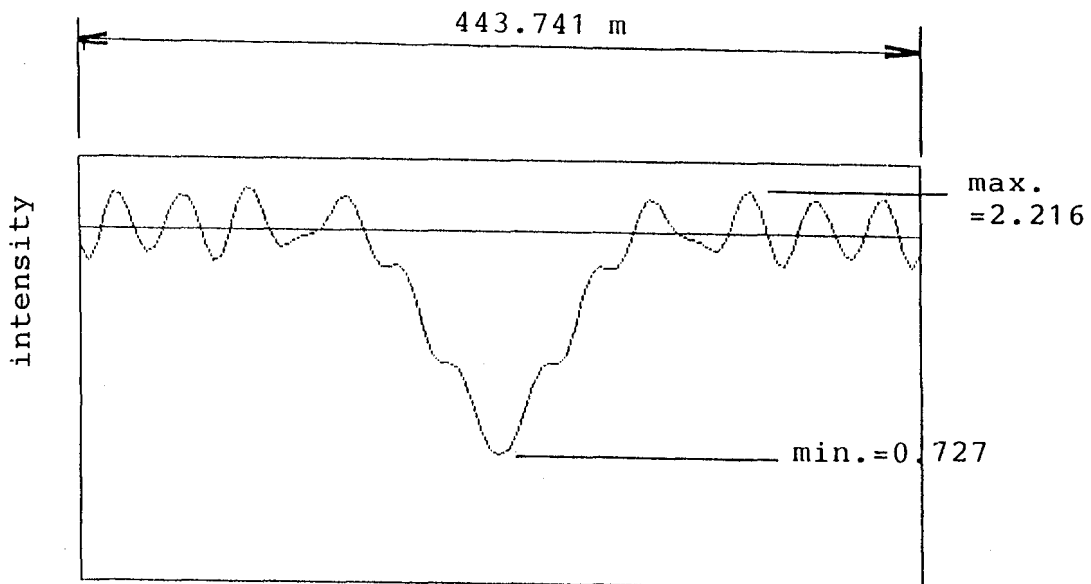


図-3.41 B-a- α 型。入射波のポテンシャルと回折波のポテンシャルを足し合わせて計算したホログラム波高に対する円柱配列例。(円柱31本)

(島直径 $D = 100 \text{ m}$ 、 $l = 103.540 \text{ m}$)

数倍にとらねばならないために多少不都合な部分もある。これを改良して計算分割幅によらない基準波高値で分割された幅を適用した円柱配列例の円柱間隔を表-3.13に示す。この場合もつと円柱を密に配列した方が望ましいと考えられる場所はあるのだが計算の収束性から密に配列できなかつた。具体的には図-3.41に示すような場所 D_1 、 D_2 、...である。

表-3.12 円柱間隔 (図-3.41)。

計算分割幅で調整した場合。(単位:m)

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_i	17.750	17.750	17.750	22.187	13.312	13.312	22.187	13.312	13.312
i	10	11	12	13	14	15	16	17	18
p_i	22.187	13.312	13.312	13.312	13.312	13.312	13.312	13.312	13.312
i	19	20	21	22	23	24	25	26	27
p_i	13.312	13.312	22.187	13.312	13.312	22.187	13.312	13.312	22.187
i	28	29	30						
p_i	17.750	17.750	17.750						

表-3.13 円柱間隔 (図-3.41)。

計算分割幅で調整しない場合。(単位:m)

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_i	12.000	18.327	14.631	20.741	15.446	21.070	12.647	12.647	23.349
i	10	11	12	13	14	15	16	17	18
p_i	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000
i	19	20	21	22	23	24	25	26	27
p_i	12.000	12.000	12.000	23.329	12.647	12.647	21.070	15.446	15.446
i	28	29	30						
p_i	20.741	18.327	12.000						

7) について検討する。

島堤が2箇所にある場合を考える。島堤中心間距離 P_{12} は 690.264 m である。島堤が多数ある場合の再生は、個々の島堤を島堤として再生できるかという分解能を考える上で必要になる。今回は1ケースしか検討できていない。

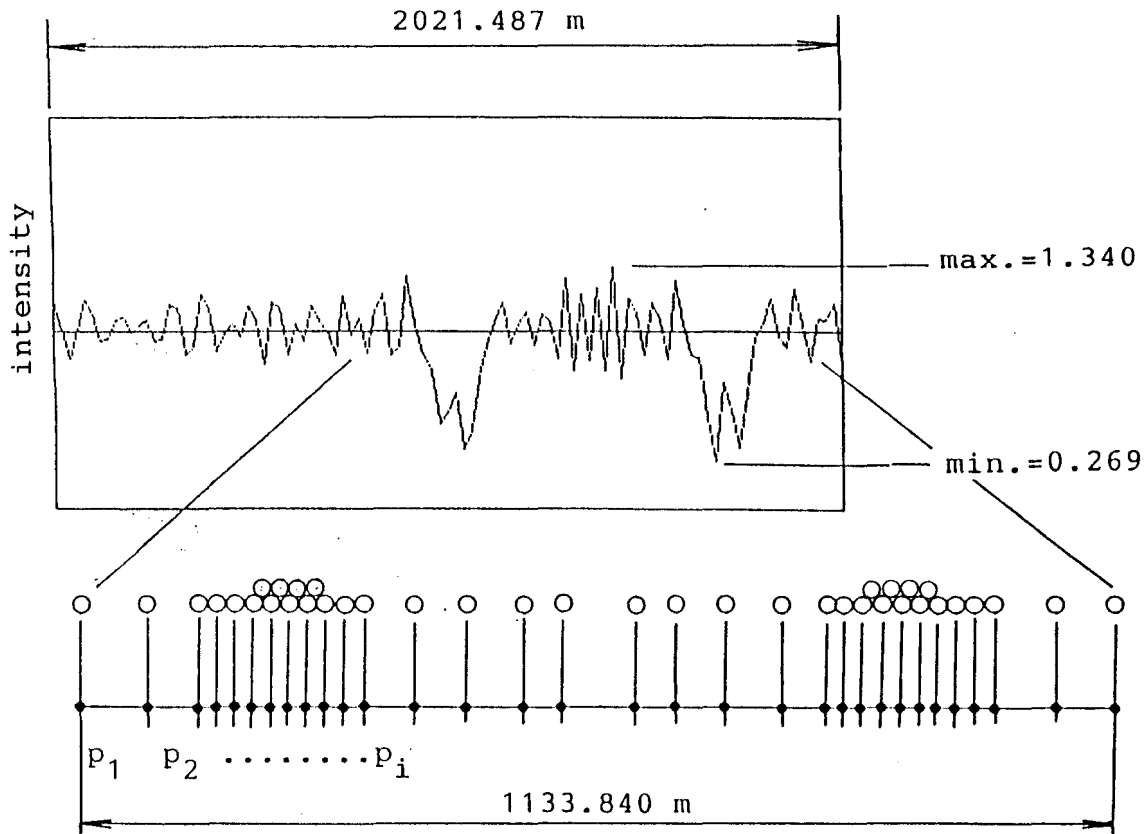


図-3.42 B-a- α 型。円形島2箇所のホログラム波高に対する円柱配列例
 (円柱40本)
 (島直径 $D = 100\text{ m} \times 2$ 箇所、 $l = 332.806\text{ m}$)
 ($P_{12} = 690.264\text{ m}$)

表-3.14 円柱中心間隔

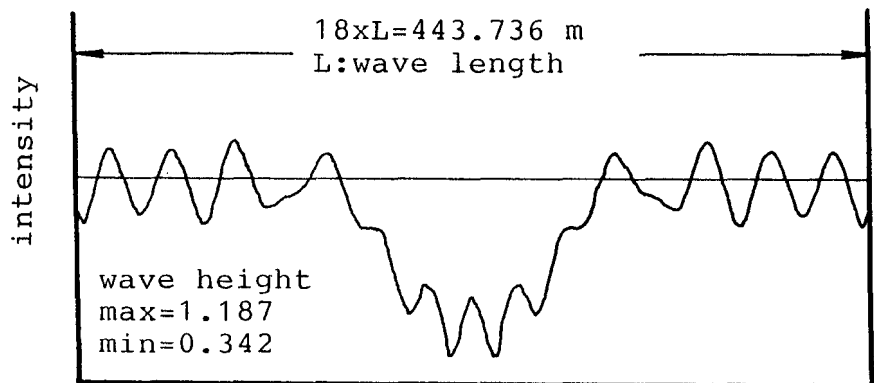
単位：m

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P _i	74.228	58.910	20.000	20.000	20.000	10.000	10.000	10.000	10.000
i	10	11	12	13	14	15	16	17	18
P _i	10.000	10.000	10.000	10.000	20.000	20.000	55.074	55.809	60.414
i	19	20	21	22	23	24	25	26	27
P _i	42.964	80.692	42.898	56.756	61.196	52.187	20.000	20.000	20.000
i	28	29	30	31	32	33	34	35	36
P _i	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	20.000
i	37	38	39						
P _i	20.000	67.191	65.724						

3.6.3 円柱配列がホログラム波高に等価かどうかの確認

再生のところで述べたように実像にしろ虚像にしろ物体像を再生できるということはホログラムを透過した波が物体光そのものの定数倍になっているということである。(3-5)では $k_1 |R|^2 O$ 、 $k_1 |R|^2 O^*$ に相当する波がホログラム面から出ているかということになる。したがって再生されているかどうか、言い替えれば波浪制御ができていないかどうかを確認するにはホログラム型波浪制御構造物を透過した直後の波が物体像(波浪制御領域)を結像する物体波であること、すなわちホログラム波高に等しいことを確認すれば良いことになる。

以下、各例においてホログラム型波浪制御構造物直後の波高分布を調べ、ホログラム波高に等しいかどうかを検討する。



イ) A型とB型の比較

図-3.43 ホログラム波高

基になるホログラム波高を再掲する。図-3.43は図-3.32と同じである。

A-a- α 型の構造物直後の波高分布を図-3.44に示す。B-a- α 型の構造物直後の波高分布を図-3.45に示す。

図-3.44の構造物直後の波高分布は中央で大きくなっておりもとのホログラム波高とは逆になっている。

図-3.45の構造物直後の波高分布は中央で小さくなっておりホログラム波高に近い。

また両側での波高が大きくなったり小さくなったり振動している状況もよく似ている。

したがってB型の構造物直後の波高分布がもとのホログラム波高に近いと言える。厳密解の場合、ポテンシャル重ね合わせの場合とにも同じことが言えるので、A型よりもB型の配列が再生には適していると言える。

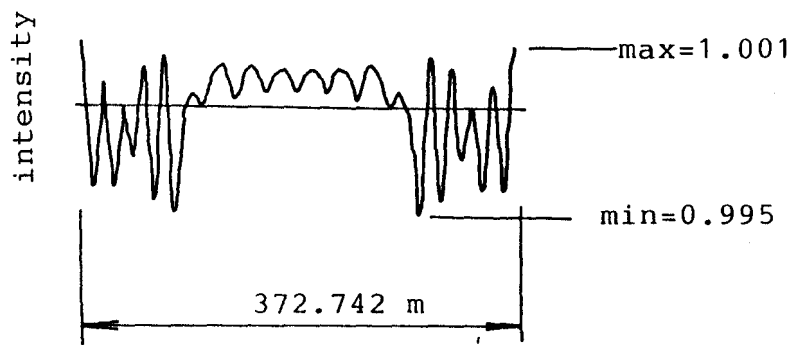


図-3.44 A-a- α 型の構造物直後の波高分布

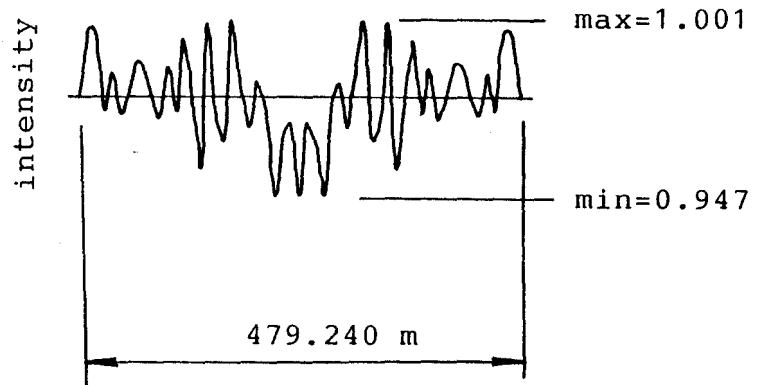


図-3.45 B-a- α 型の構造物直後の波高分布

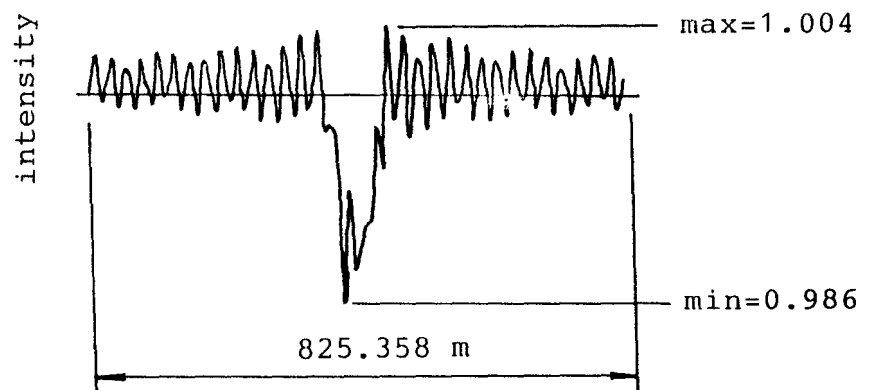


図-3.46 B-a- α 型の構造物直後の波高分布

ロ) a型とb型の比較

a型の例として図-3.45を選ぶ。b型の例としてはB-b- α 型を選び構造物直後の波高分布を図-3.46に示す。

図-3.46の構造物直後の波高分布は中央で小さくなっているが、両側の円柱の効果ができればさらにホログラム波高に近づくとと言える。

同じB-a- α 型でも図-3.45と比べてみると波高の振動的な形状などは図-3.45の方が適当であると言える。

したがってb型よりもa型の方が適当であると言える。つまりホログラム波高として考えるべき幅は、物体（島堤）の代表的な幅（今の場合島堤の直径）に対して $60/150=0.4$ 倍である図-3.46よりも $443/100=4.4$ 倍である図-3.45の方が適していると言える。これだけでは確定的なことは言えないが、ほぼ直径の約3倍程度の幅が必要であろうと思われる。

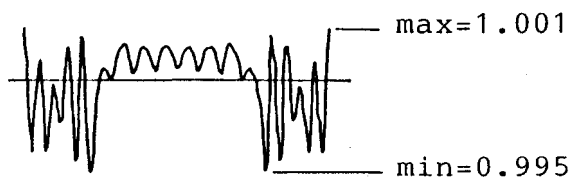
ハ) 円柱群構造物からの距離lの変化によるホログラム波高の変化

ホログラム構造物直後の波高分布をホログラム波高と呼ぶ。ここではlが大きくなる、つまり構造物から離れるにつれて、構造物に平行な方向への波高分布がどう変化するかを調べる。これはホログラム波高に等価な波高分布を構造物直後で再現されているかどうかと、もし再現されていないならどの程度離ればホログラム波高に近くなるかを調べようとするものである。表-3.15に検討例一覧を示す。

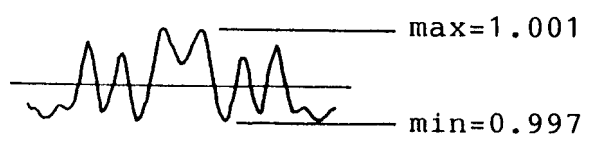
表-3.15 ホログラム波高検討例一覧

検討例	円柱配列型	配列例	構造物直後の波高分布	再生図
1)	A-a- α	図-3.31 (円柱26本)	図-3.47	図-3.67 重ね
			図-3.48	図-3.68 蔽密
		図-3.32 (円柱21本)	図-3.49	図-3.69
			図-3.50	図-3.70

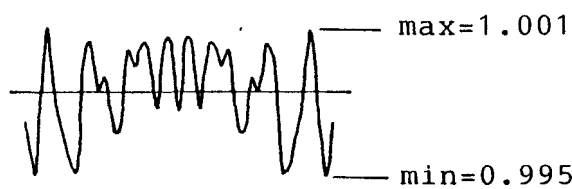
	B - a - α	図 - 3. 3 3 (円柱 2 5 本)	図 - 3. 5 1	図 - 3. 7 1
			図 - 3. 5 2	図 - 3. 7 2
		図 - 3. 3 4 (円柱 4 5 本)	図 - 3. 5 3	図 - 3. 7 3 重ね
2)	B - b - α	図 - 3. 3 5 (円柱 1 2 本)	図 - 3. 5 4	図 - 3. 7 4 重ね
			図 - 3. 5 5	図 - 3. 7 5 厳密
4)	B - a - α	図 - 3. 3 7 (円柱 3 7 本)	図 - 3. 5 6	図 - 3. 7 6 重ね
	B - a - α	図 - 3. 3 2 (円柱 2 1 本)	図 - 3. 5 7	図 - 3. 7 7 重ね
			図 - 3. 5 8	図 - 3. 7 8 重ね
7)	B - a - α	図 - 3. 4 2 (円柱 4 0 本)	図 - 3. 5 9	図 - 3. 7 9 厳密
	B - a - α	図 - 3. 3 3	図 - 3. 6 0 の中央部分のみ (円柱 9 本)	図 - 3. 8 0 厳密
6)	B - a - α	図 - 3. 4 1 (円柱 3 1 本)	図 - 3. 6 1	図 - 3. 8 1 厳密



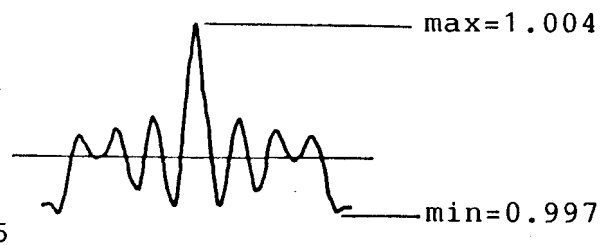
(a) $l=6.903$ m



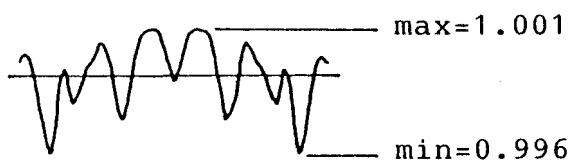
(d) $l=207.078$ m



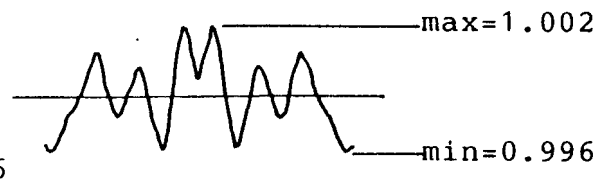
(b) $l=69.026$ m



(e) $l=276.104$ m

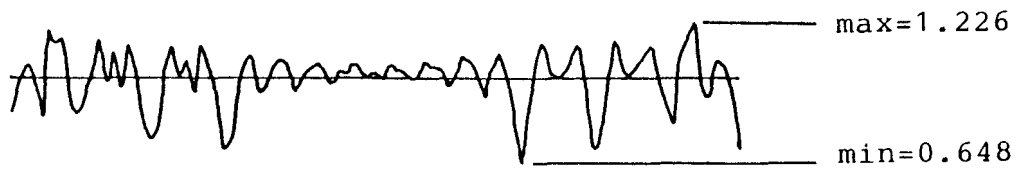


(c) $l=138.052$ m

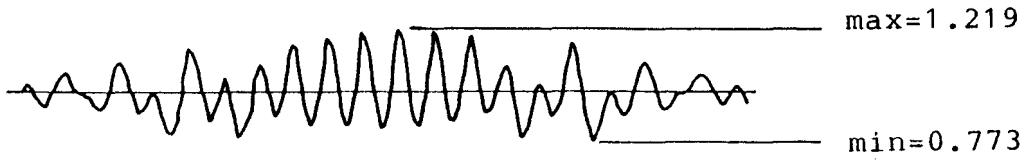


(f) $l=345.132$ m

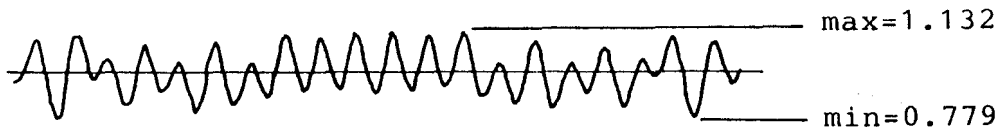
図-3.47 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
(図-3.31の配列、図-67の再生の場合)



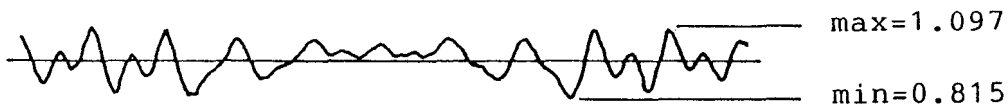
(a) $l=3.451$ m



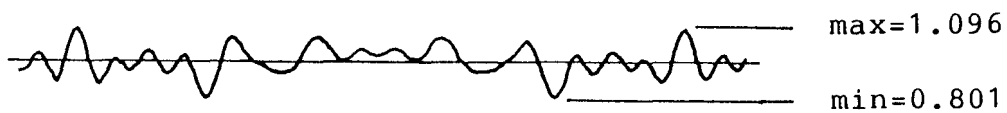
(b) $l=34.513$ m



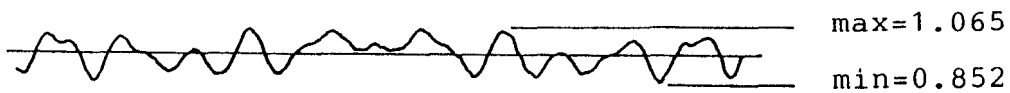
(c) $l=69.026$ m



(d) $l=120.796$ m

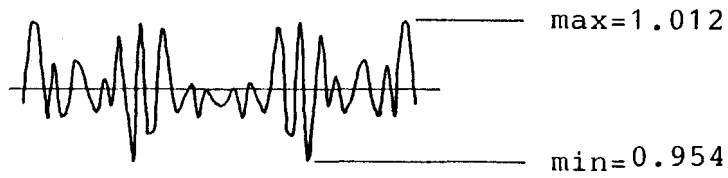


(e) $l=138.052$ m

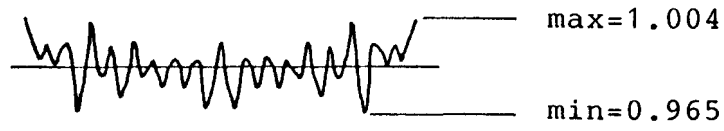


(f) $l=172.565$ m

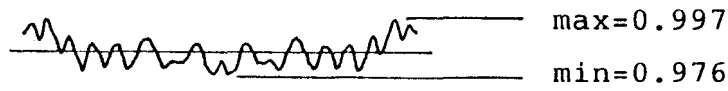
図-3.48 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
(図-3.31の配列、図-3.68の再生の場合)



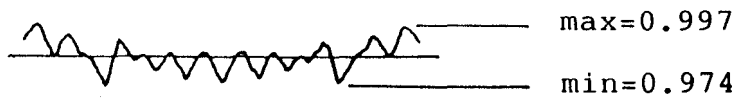
(a) $l=6.903$ m



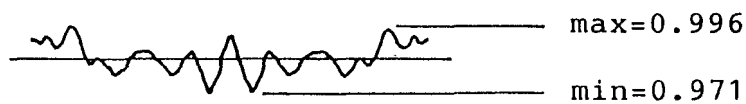
(b) $l=69.026$ m



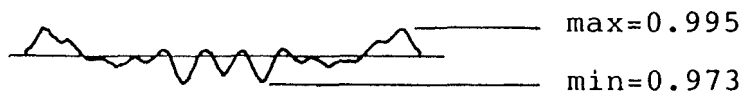
(c) $l=138.052$ m



(d) $l=207.078$ m

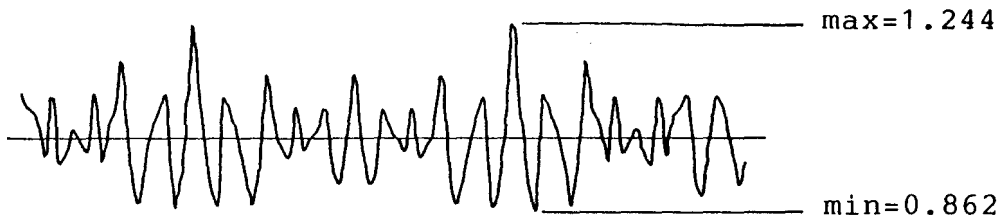


(e) $l=276.104$ m

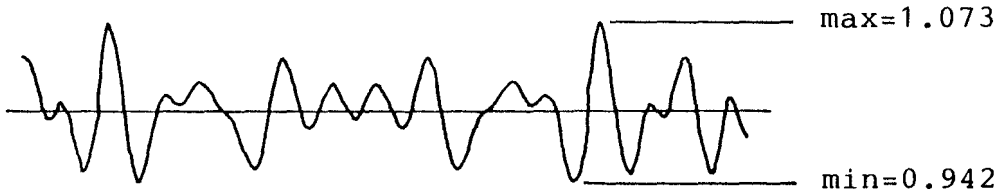


(f) $l=345.130$ m

図-3.49 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
(図-3.32の配列、図-3.69の再生の場合)



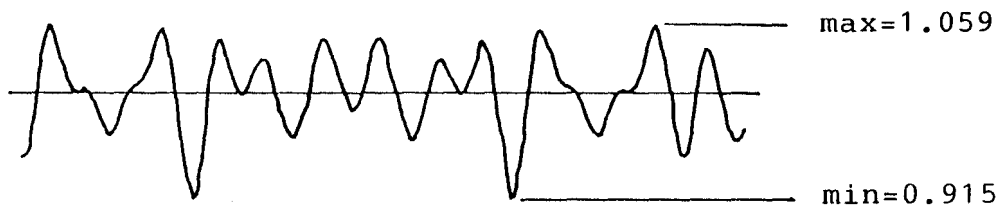
(a) $l=3.451$ m



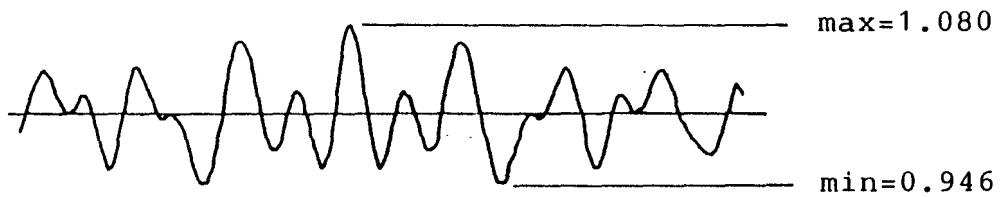
(b) $l=34.513$ m



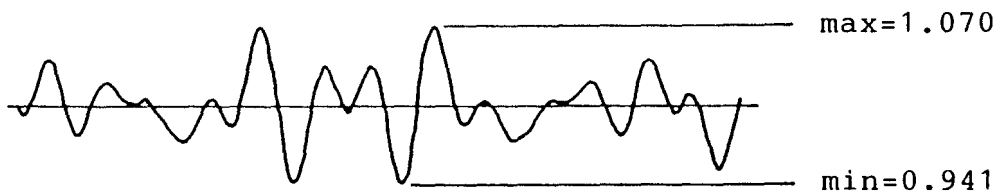
(c) $l=69.026$ m



(d) $l=103.539$ m

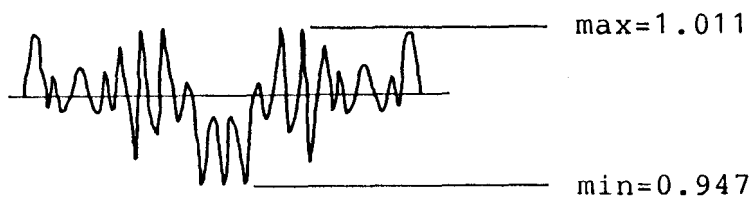


(e) $l=138.052$ m

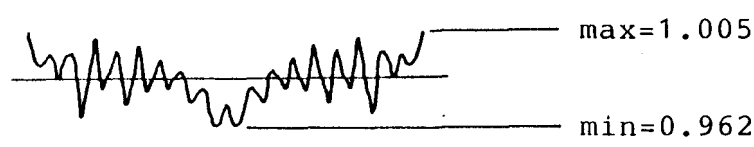


(f) $l=172.565$ m

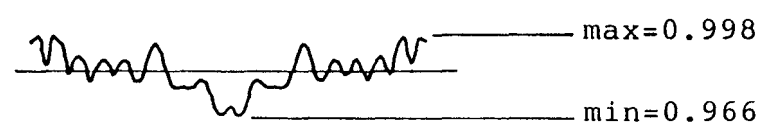
図-3.50 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
(図-3.32の配列、図-3.70の再生の場合)



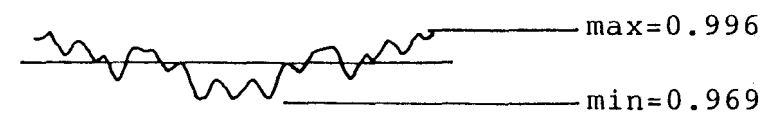
(a) $l=6.903$ m



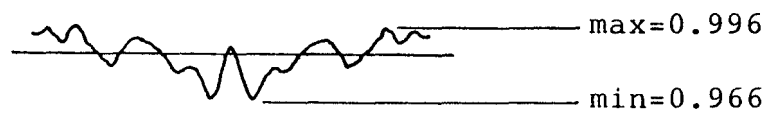
(b) $l=69.026$ m



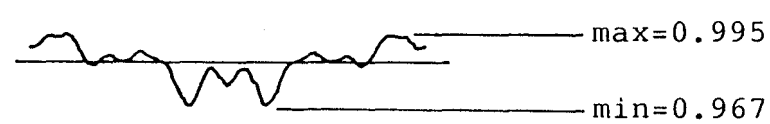
(c) $l=138.052$ m



(d) $l=207.078$ m

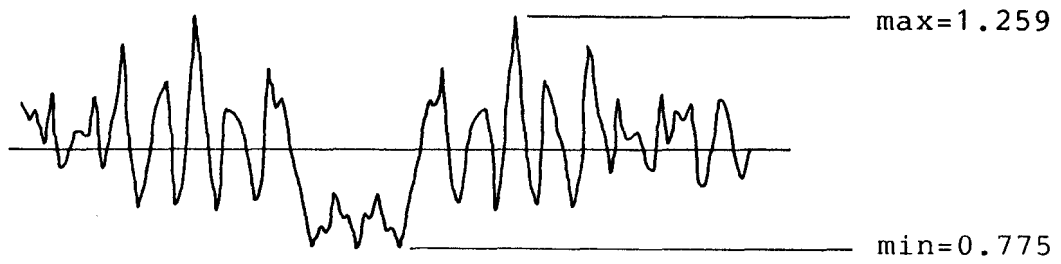


(e) $l=276.104$ m

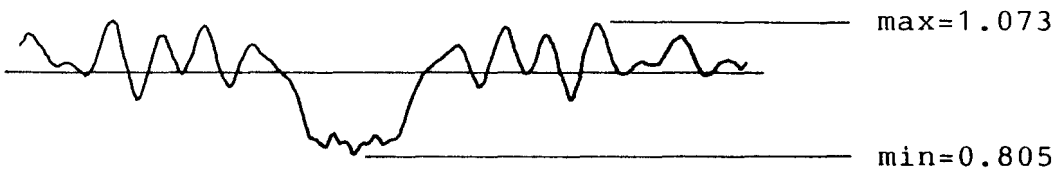


(f) $l=345.132$ m

図-3.51 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
(図-3.33の配列、図-3.71の再生の場合)



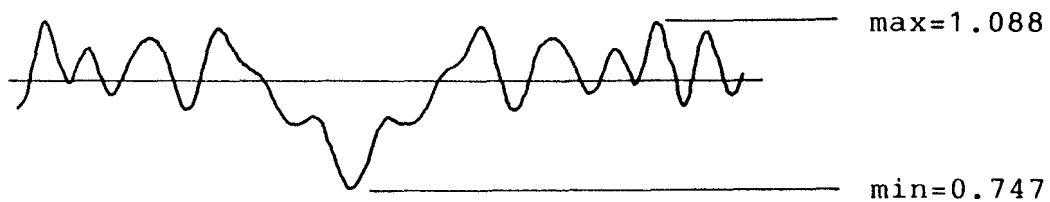
(a) $l=3.451$ m



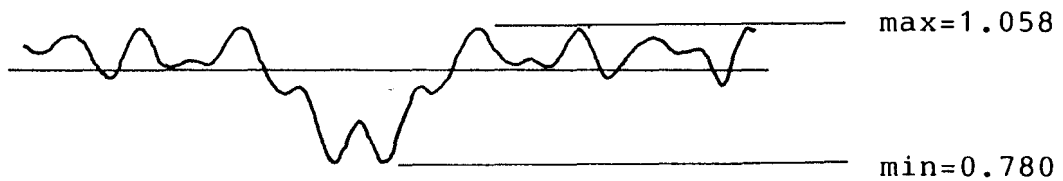
(b) $l=34.513$ m



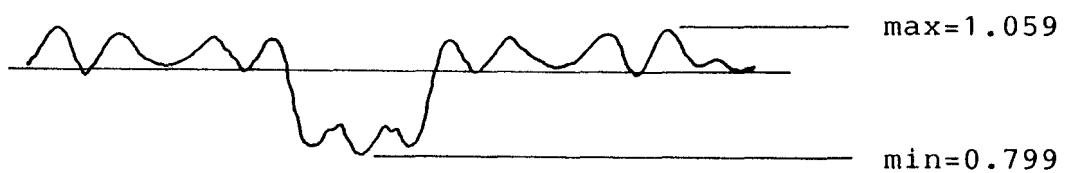
(c) $l=69.026$ m



(d) $l=103.539$ m



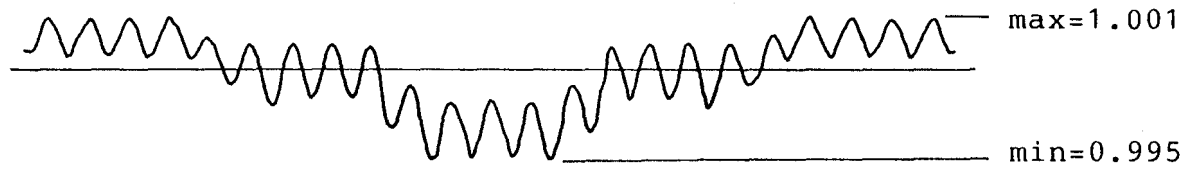
(e) $l=138.052$ m



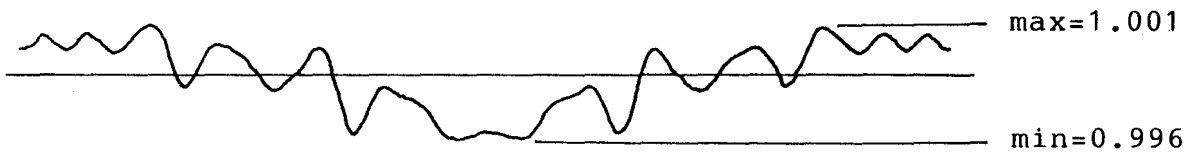
(f) $l=172.565$ m

図-3.52 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布

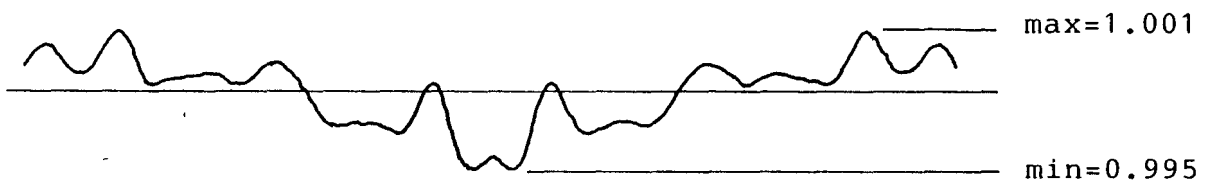
(図-3.33の配列、図-3.72の再生の場合)



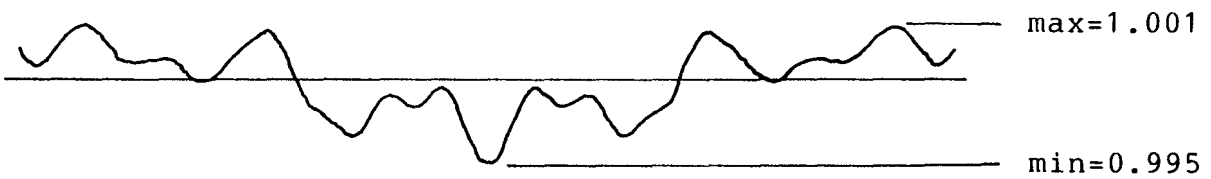
(a) $l=13.805$ m



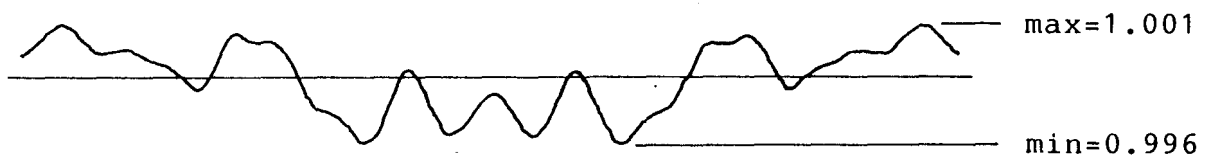
(b) $l=69.027$ m



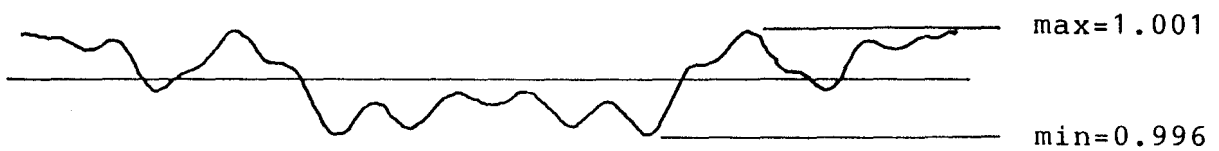
(c) $l=138.053$ m



(d) $l=207.080$ m



(e) $l=276.106$ m



(f) $l=345.132$ m

図-3.53 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布

(図-3.34の配列、図-3.73の再生の場合)

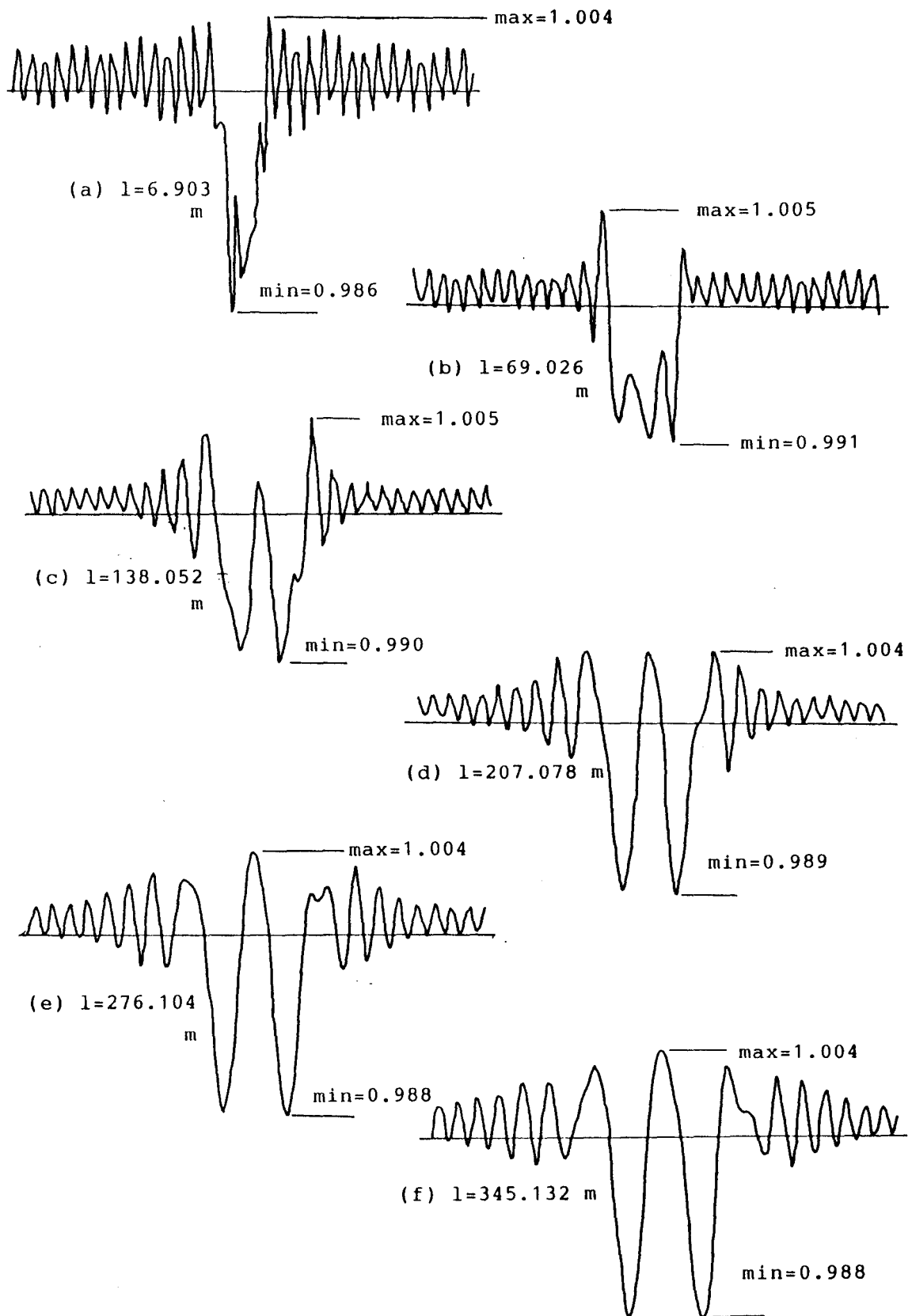
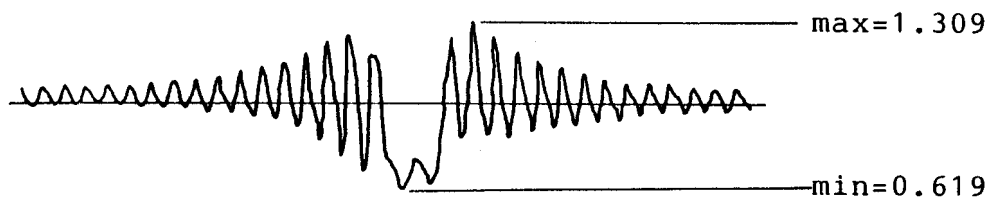
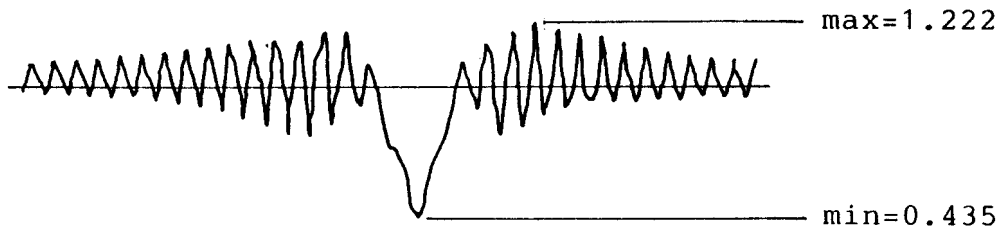


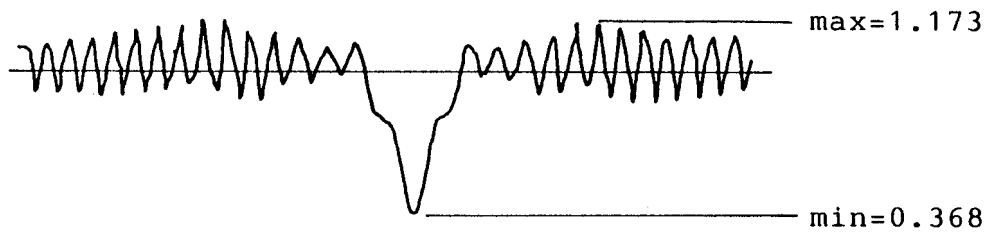
図-3.54 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
 (図-3.35の配列、図-3.74の再生の場合)



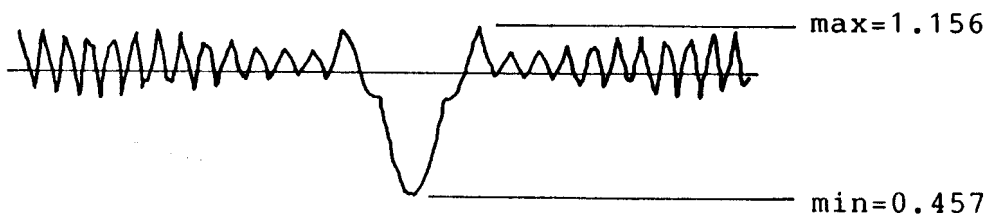
(a) $l=17.257$ m



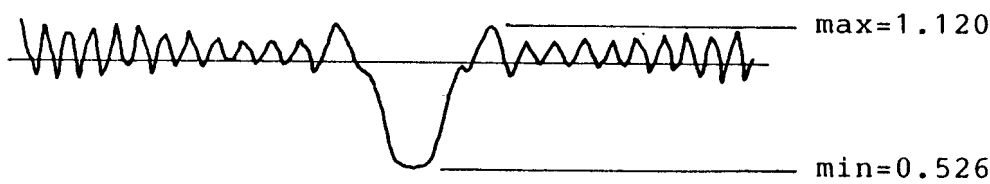
(b) $l=34.513$ m



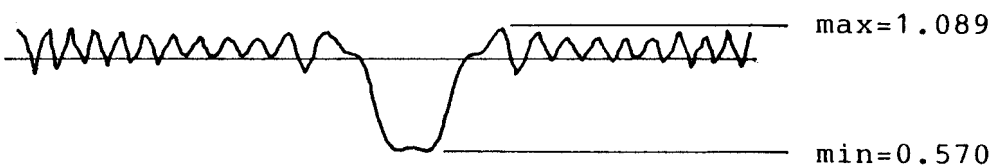
(c) $l=69.026$ m



(d) $l=103.539$ m



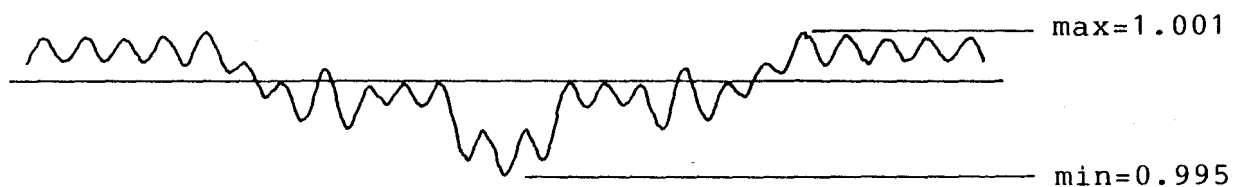
(e) $l=138.052$ m



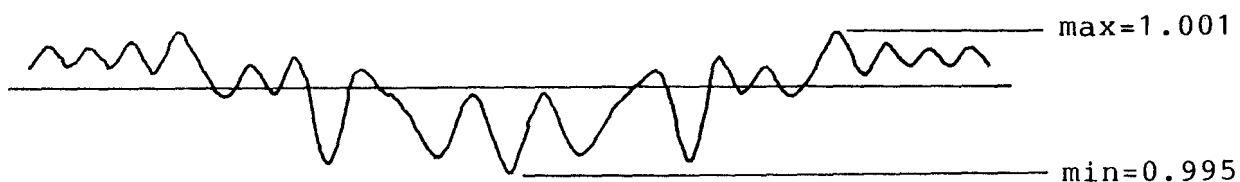
(f) $l=172.565$ m

図-3.55 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布

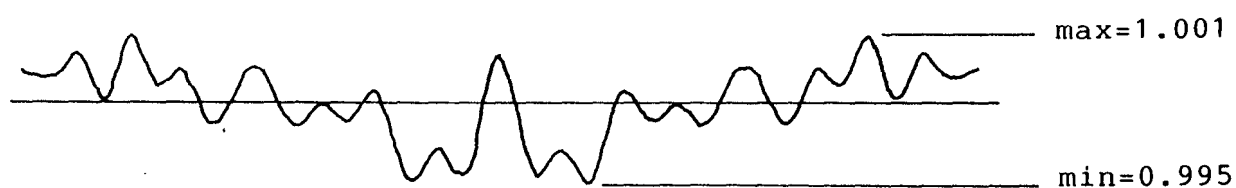
(図-3.35の配列、図-3.75の再生の場合)



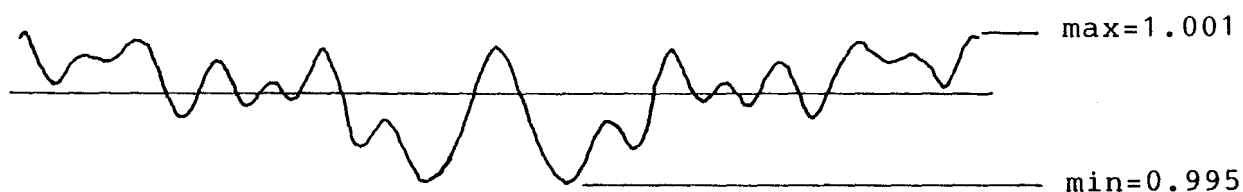
(a) $l=13.805$ m



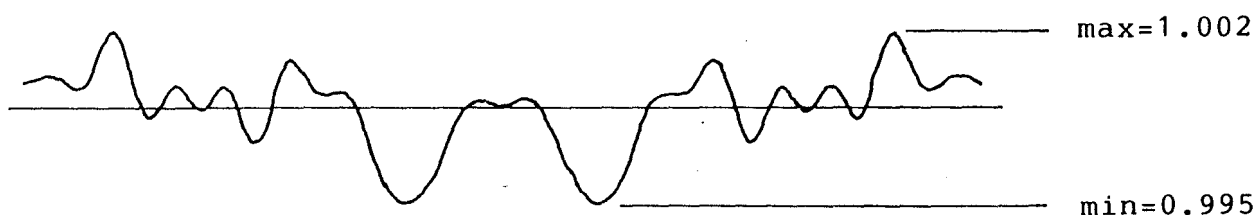
(b) $l=69.027$ m



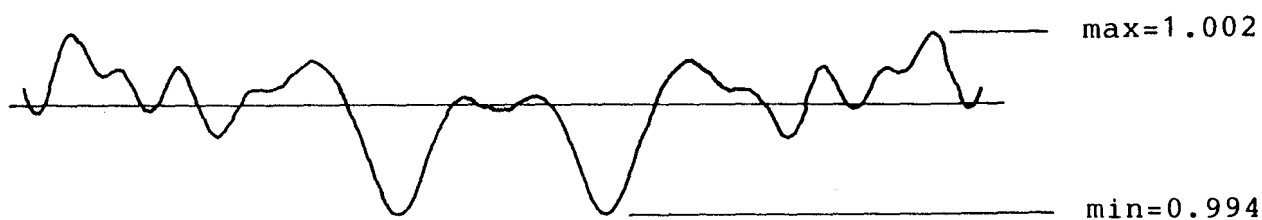
(c) $l=138.053$ m



(d) $l=207.080$ m



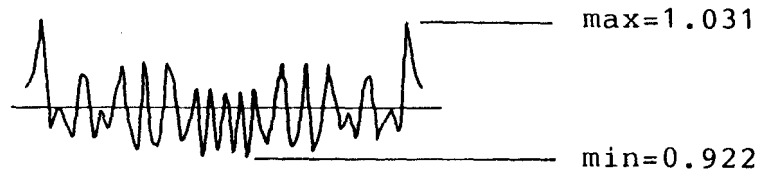
(e) $l=276.106$ m



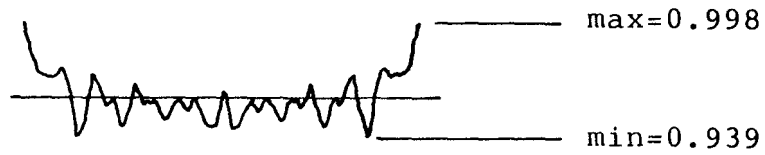
(f) $l=345.132$ m

図-3.56 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布

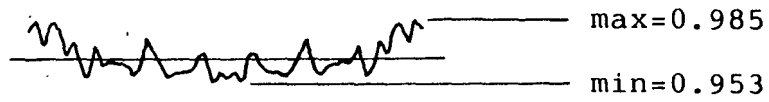
(図-3.37の配列、図-3.76の再生の場合)



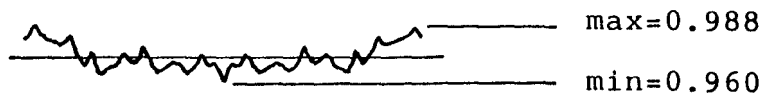
(a) $l=6.903$ m



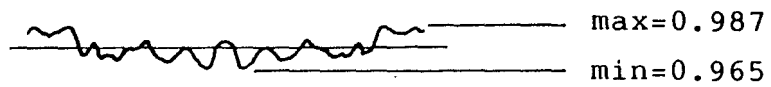
(b) $l=69.026$ m



(c) $l=138.052$ m



(d) $l=207.078$ m

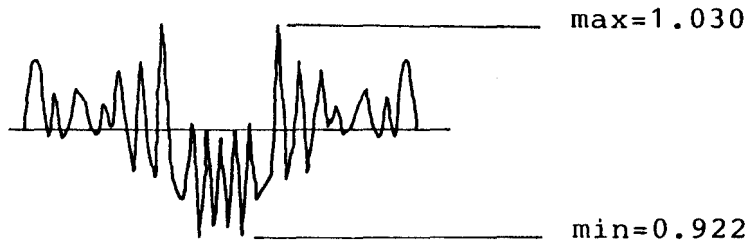


(e) $l=276.104$ m

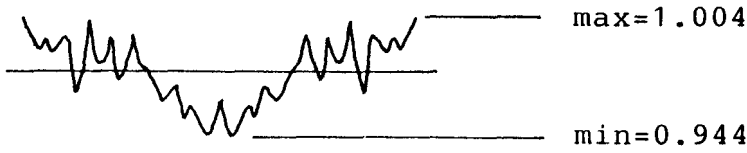


(f) $l=345.132$ m

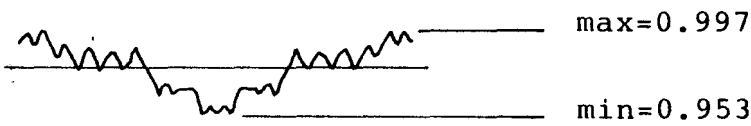
図-3.57 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
(図-3.32の配列、図-3.77の再生の場合)



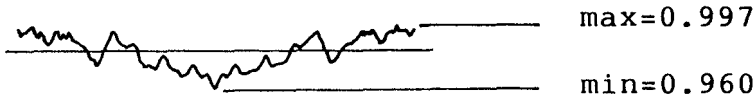
(a) $l=6.903$ m



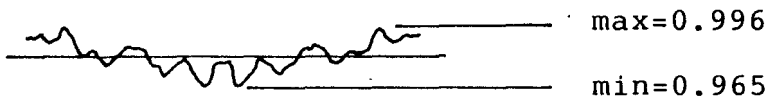
(b) $l=69.026$ m



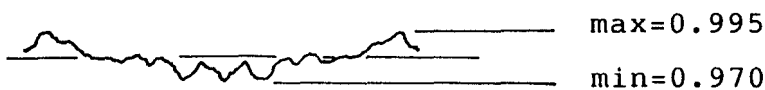
(c) $l=138.052$ m



(d) $l=207.078$ m



(e) $l=276.104$ m



(f) $l=345.132$ m

図-3.58 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布

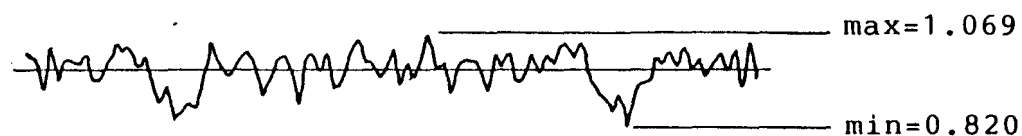
(図-3.32の配列、図-3.78の再生の場合)



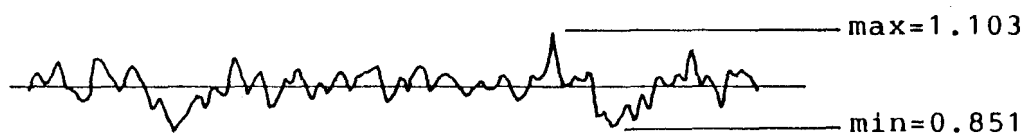
(a) $l=9.861$ m



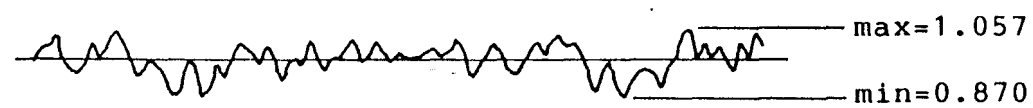
(b) $l=98.609$ m



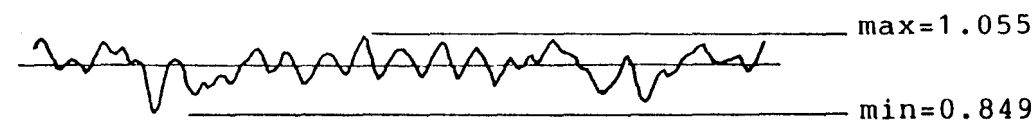
(c) $l=197.218$ m



(d) $l=295.827$ m



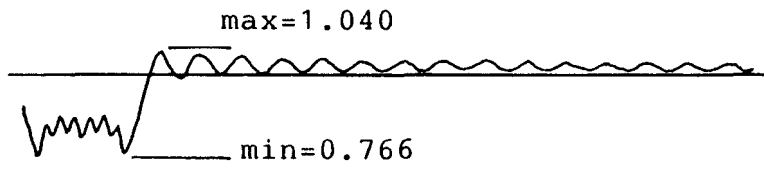
(e) $l=394.436$ m



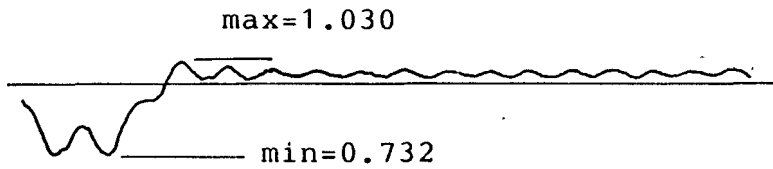
(f) $l=493.045$ m

図-3.59 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布

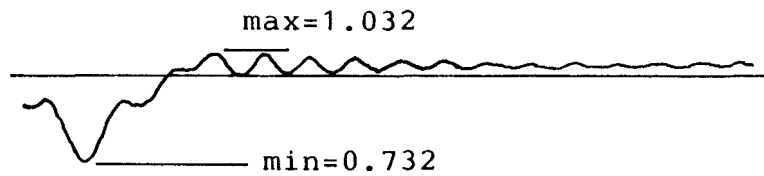
(図-3.42の配列、図-3.79の再生の場合)



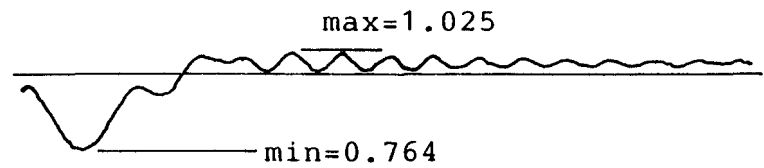
(a) $l=3.451$ m



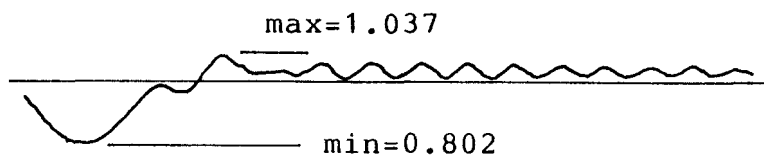
(b) $l=34.513$ m



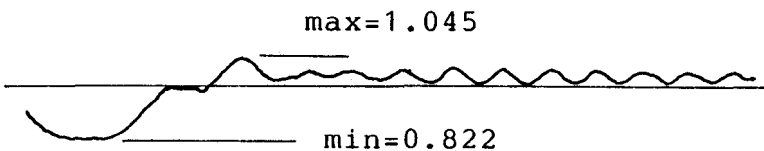
(c) $l=69.026$ m



(d) $l=103.539$ m

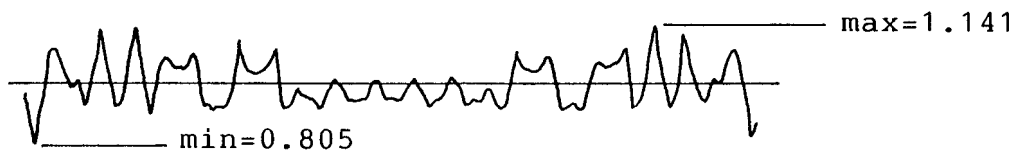


(e) $l=138.052$ m

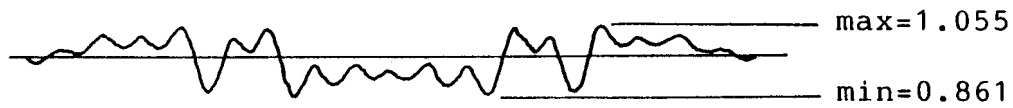


(f) $l=172.565$ m

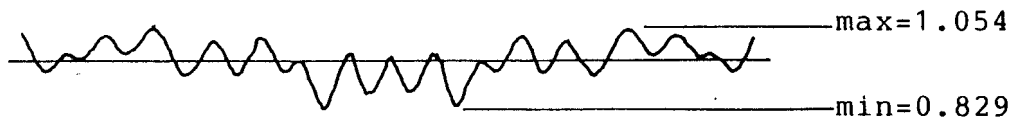
図-3.60 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
(図-3.33の配列の場合)



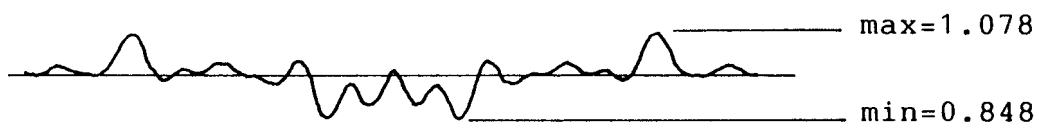
(a) $l=3.451$ m



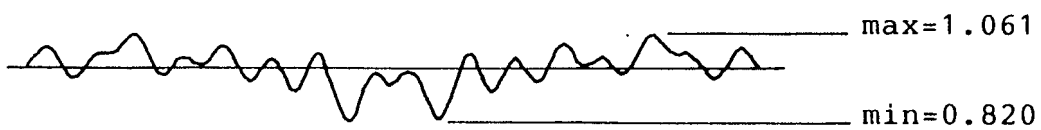
(b) $l=34.513$ m



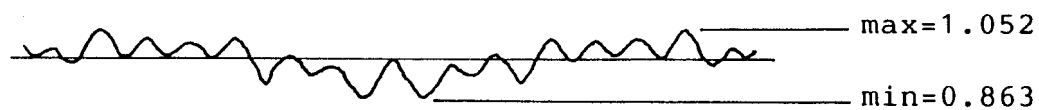
(c) $l=69.026$ m



(d) $l=103.539$ m



(e) $l=138.052$ m



(f) $l=172.565$ m

図-3.61 構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布

(図-3.41の配列、図-3.80の再生の場合)

3.7 ホログラフィ型円柱群の波浪制御状況（再生）

ホログラフィ型の円柱群に入射波と同じ波があたった場合の波浪制御状況を確認することが光ホログラフィの場合の再生に相当する。波浪制御状況を確認する方法としてポテンシャルの重ね合わせによる方法と級数解による厳密解を求める方法とがある。円柱1本の場合のポテンシャルを重ね合わせる方法は簡単で計算時間も早い。まずはポテンシャルの重ね合わせ手法について検討する。

3.7.1 ポテンシャルの重ね合わせから求めた波高分布の精度

ポテンシャルの重ね合わせ解と厳密解の誤差がどの程度であるかを円柱が2、3本の各場合について調べる。多円柱の場合の厳密解を求める場合、円柱間隔は円柱直径の約3倍以上でないとな解が妥当でなくなる。したがって重ね合わせ解を厳密解と比較する場合に限って円柱間隔を円柱直径の3倍以上にしている。

イ) 円柱2本の場合

重ね合わせ解は図-3.62のように、円柱2本の場合のポテンシャルを円柱1本のポテンシャルを足し合わせて求める。使用円柱直径 D は4m、円柱間隔 P は波長の1.8倍である。計算条件は水深 $h = 10$ m、周期 $T = 4$ secである。式(3.48)で波高分

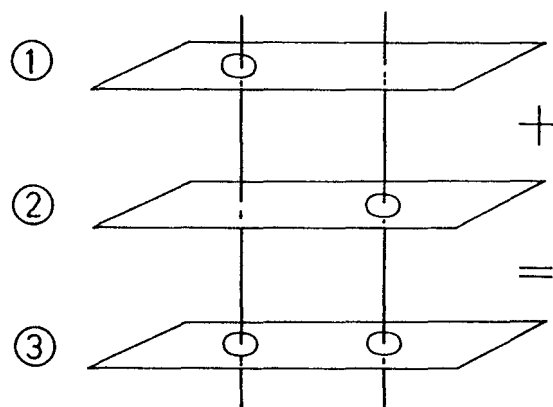


図-3.62 円柱2本の場合の重ね合わせ法

$$\left(\frac{\textcircled{1} + \textcircled{2}}{2} = \textcircled{3} \right)$$

布を求める。厳密解との差を誤差とし、誤差をその点での厳密解の波高で割った比を百分率で表示したのが図-3.63の誤差図である。誤差が2%程度以下になるのは円柱から約200m以内の円柱近傍に限られる。さらに誤差が3%以内になるのは円柱から約100m以内に限られることがわかる。

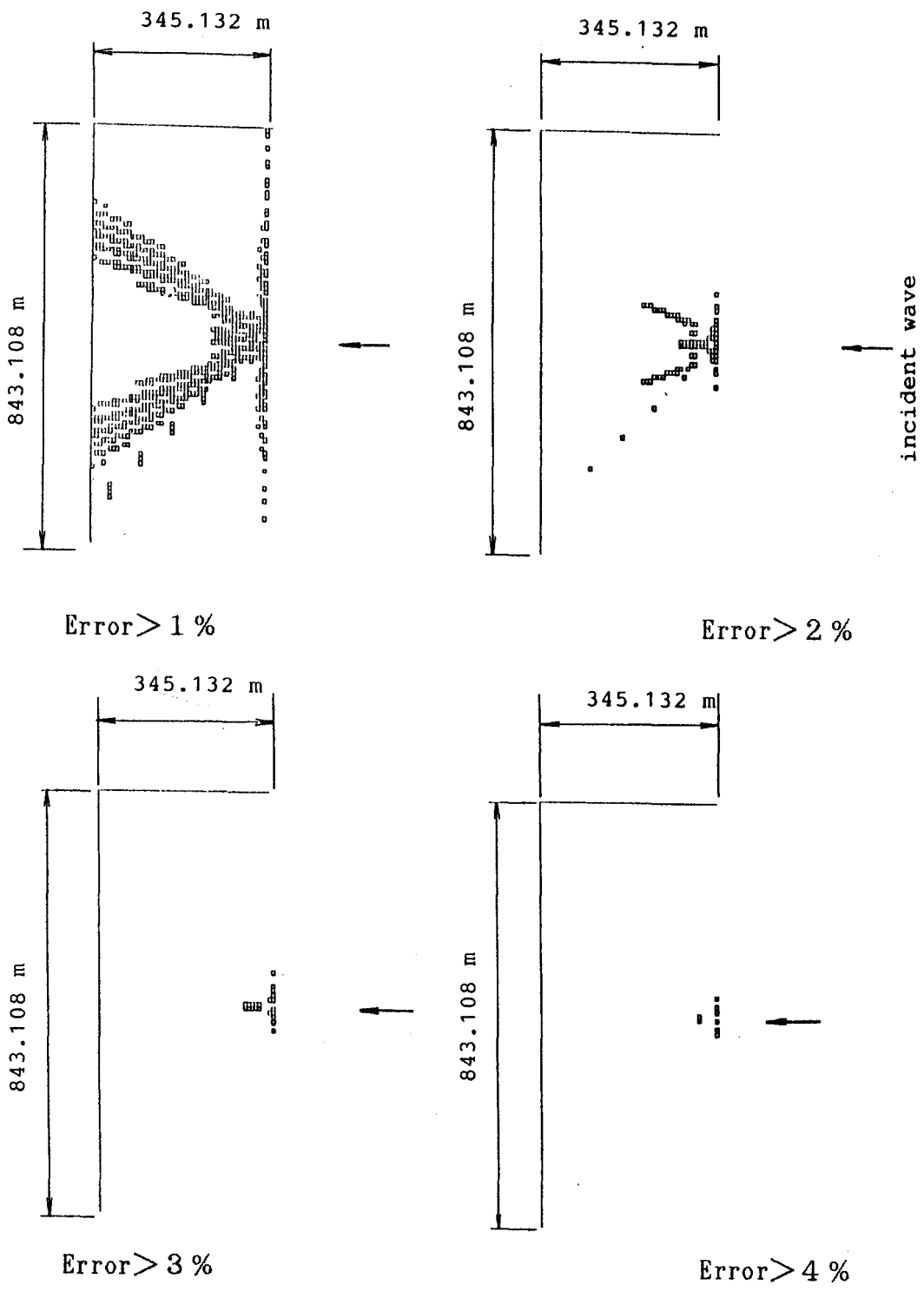


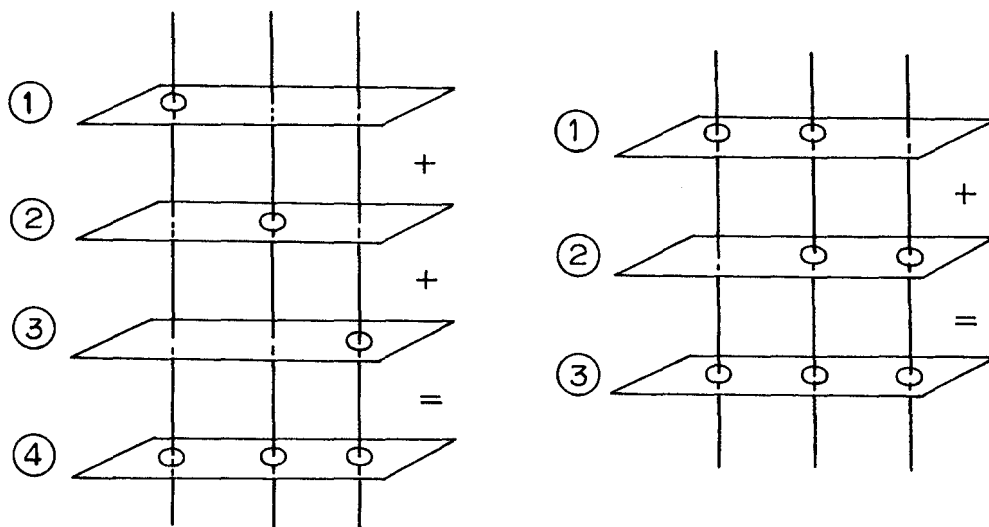
図-3.63 厳密解と重ね合わせ解との比較

ロ) 円柱3本の場合

重ね合わせ解は図-3.64 aのように、円柱3本の場合のポテンシャルを円柱1本のポテンシャルを足し合わせて求める方法の他に円柱2本の場合のポテンシャルを図-3.64 bのように中央の円柱が重なるように足し合わせて求める方法が考えられる。

使用円柱形Dは4m、円柱間隔Pは波長Lの1.8倍である。水深hは10m、周期は4sec、波長Lは24.652m。

円柱2本の場合と同じ定義の誤差図が図-3.65、3.66である。(a)の方法では誤差が3%程度以下であるのは円柱中心から約170mの中である。(b)の方法では誤差が8%程度以下であるのは円柱中心から約60mの中である。



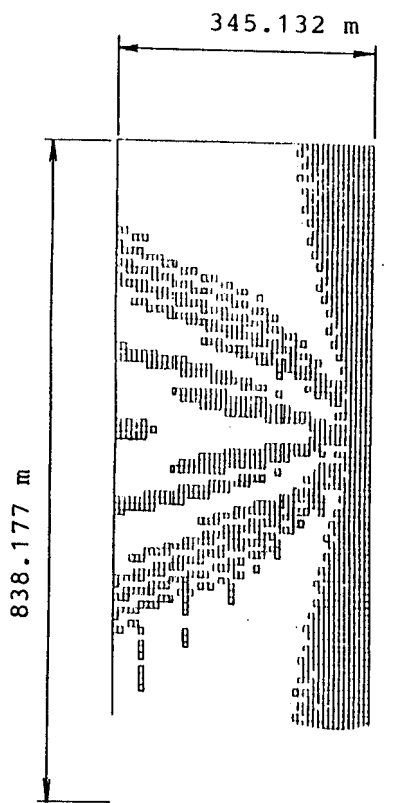
a) 円柱1本の場合のポテンシャルを3枚重ね合わせる方法

$$\left(\frac{\textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3}}{3} = \textcircled{4} \right)$$

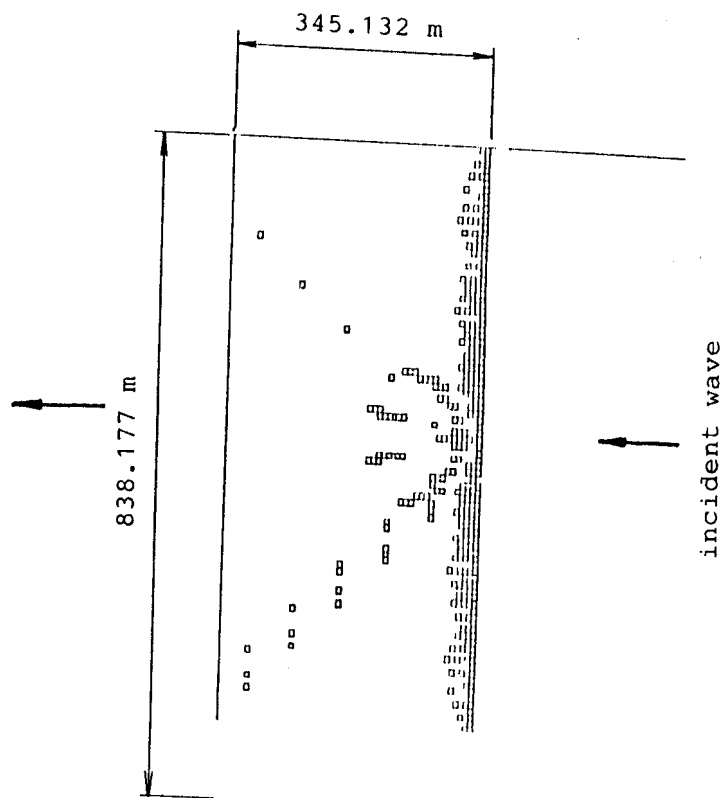
b) 円柱2本の場合のポテンシャルを1本が重なるように2枚重ね合わせる方法

$$\left(\frac{\textcircled{1} + \textcircled{2}}{2} = \textcircled{3} \right)$$

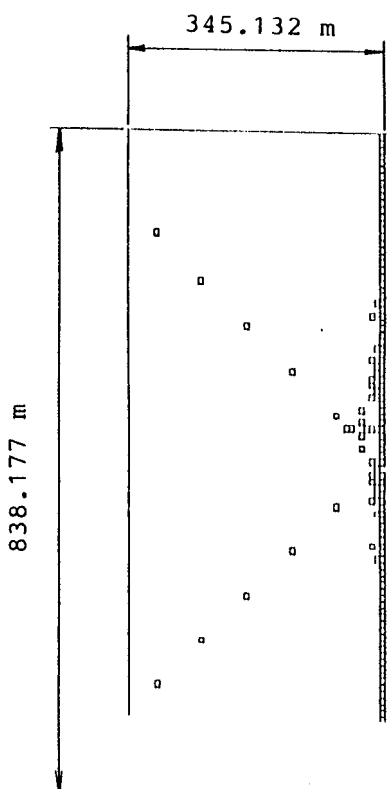
図-3.64 円柱3本の場合の重ね合わせ法



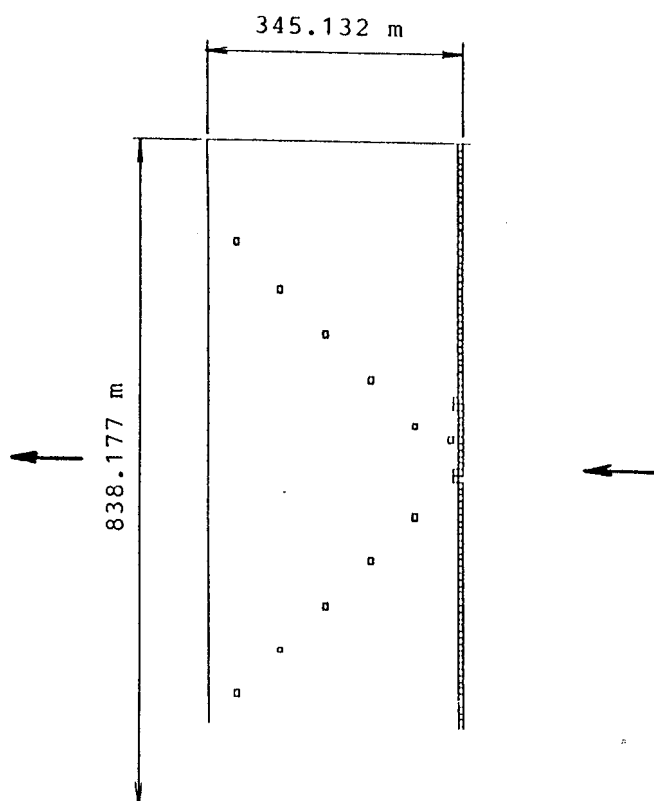
Error > 1 %



Error > 2 %



Error > 3 %



Error > 5 %

図-3.65 (a)の方法による重ね合わせ解と厳密解との誤差

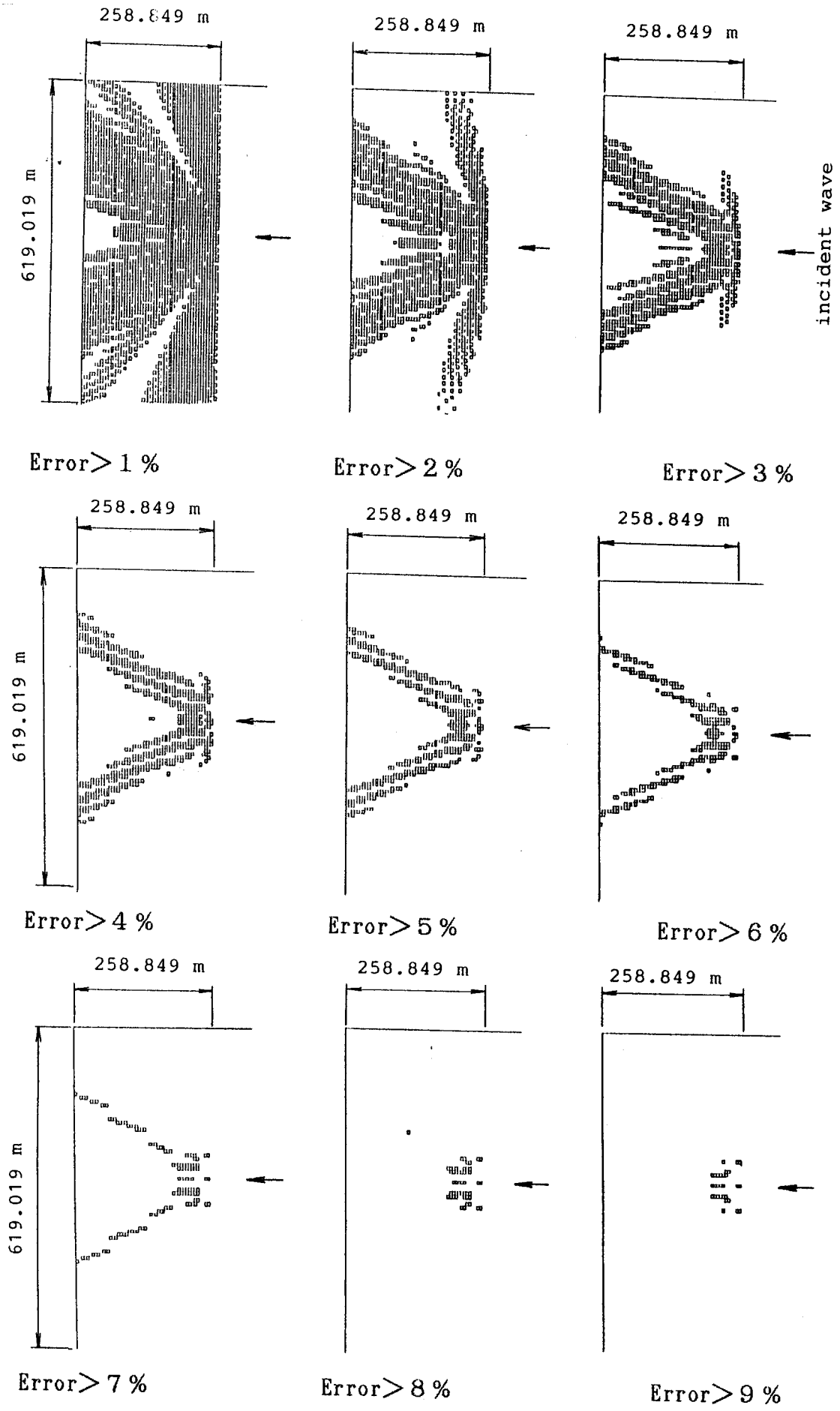


図-3.66 (b)の方法による重ね合わせ解と厳密解との誤差

3. 7. 2 円柱多数本の場合のポテンシャルの重ね合わせ解と厳密解の比較

円柱1本の場合のポテンシャルを必要本数分重ね合わせる方法、さらに円柱本数を増やして円柱2本の場合のポテンシャルを1組として必要組数分重ね合わせる方法というように、順次円柱本数を増やす方法が考えられる。多数本の場合のポテンシャルを1組として重ね合わせる方法は、円柱1本の場合のポテンシャルを重ね合わせる方法に比べて厳密解に近くなることは当然である。多数本の場合のポテンシャル計算は収束までの繰り返し回数が多くなり時間を要するのに比べ、円柱1本の場合のポテンシャル計算は計算時間も短く、重ね合わせも容易である。

ただ円柱1本のポテンシャルの重ね合わせ解は円柱本数が多くなって円柱と円柱のスリット間隔が小さくなると波を透過しにくくなるにもかかわらず、このことを満足しない不都合さがある。このことを考えると多数本を1組とするポテンシャルの重ね合わせ法の方がより厳密解に近くなると考えられる。

ここでは簡便さも捨てがたいので、3-4-2で述べたようなホログラフィ型の各円柱配列例について円柱1本の場合のポテンシャルを円柱配列本数分重ね合わせ波高分布を計算した結果を順に示す。またそれぞれの場合の厳密解の結果も比較できるように併せて示す。

波浪制御領域を直径Dの円形領域とする。直径として $D = 100\text{ m}$ 、 150 m 、波としては神戸港沖の実測データを参考にして、周期 $T = 4\text{ sec}$ 、水深 $h = 10\text{ m}$ 、波長 $L = 24.652\text{ m}$ と考えた。

3. 6. 4のであげた検討例1) について考察する。 $A - a - \alpha$ 型と $B - a - \alpha$ 型の比較である。

$A - a - \alpha$ 型の配列例として、図-3. 31 (表3. 5) の円柱26本の配列に対して重ね合わせ解から求めた波高分布と厳密解から求めた波高分布をそれぞれ図-3. 67、68に示す。

図-3. 67の中に実線で島堤領域を示しているが、その中では波高は比較的大きい。ただ島堤領域の左に直径約50m程度の波高のさらに高い範囲が円形状に確認できる。(破線で示す。)

1) A-a- α とB-a- α の比較 (AかBかどちらが適当か)

A-a- α の場合

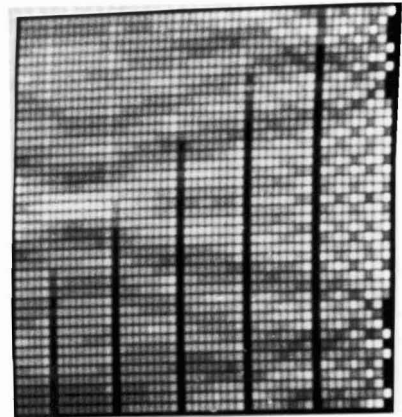
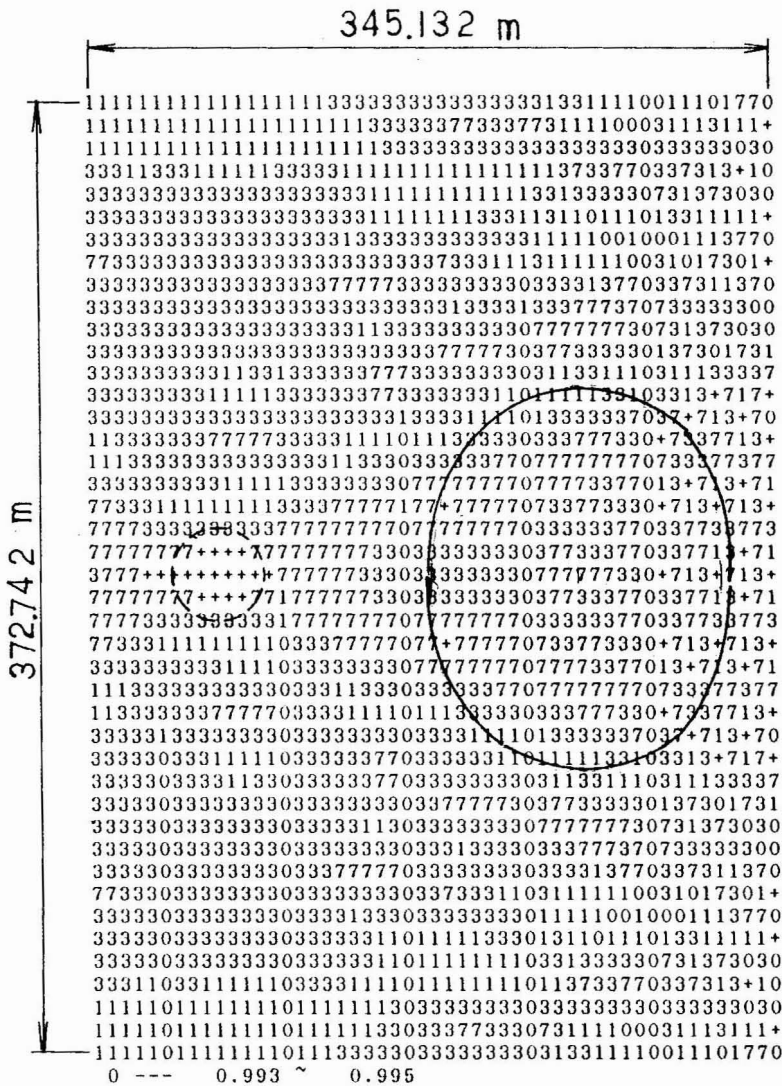
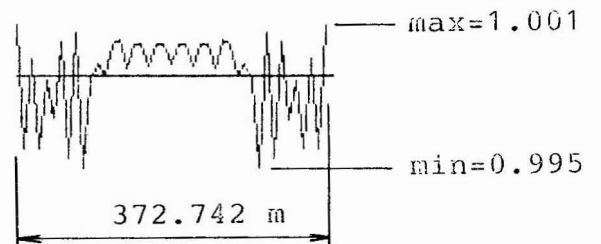


写真-3.1 波高分布の濃淡表示

Symbol Wave height

- 0 ... 0.993-0.996
- 1 ... 0.996-0.998
- 3 ... 0.998-1.000
- 7 ... 1.000-1.002
- + ... 1.002-1.005



構造物直後の波高分布

図-3.67 A-a- α 型の場合のポテンシャル重ね合わせ法による構造物背後の波高分布 (記号表示)

(島直径D=150m、 $l=103.5$ m、円柱本数26本
 使用円柱径=4m、 $\Delta x=6.9026$ m、 $\Delta y=8.8748$ m)

517.697 m

```

277777222277777227778887222277772222222122787200
2222777722227777722277888722227777222772211277720
2222277722222777722277888722227777222777211277#
7222222277722222777222277888722227777222777210170
7777222222772222277722112277772227772227772120
7777222222772222277722112277722277722278++820
77777772222772222277221112272227777778++8#
7777777722227772222777221122772227887222780
77777778777222777722227772222777222777210170
7772222777777722777772227788722277722227221#
222222222777777777877722778887222222111278820
2222222222777777778887222778877222222222772#
222222222222227777777788872222777222777210280
2222222222222277772227777221127777777721270
77722222277722112222221112277222278777788+870
777777222277722111222211127772227777278++70
777777722227772211112222111277877222777722270
777777772222777221112277222277722277722277210280
222222777722227777222777721112772222211122#
222222277772227788877777721112277211277210
22222222777777722777772222777211122211277200
222222222777777227777722227772111227221112#
22222777222277722122277722277722227722277210280
22222777722222222211127772222788772227770
22222222272221111222221112777222278887222++70
772222222222211112222211122772222788888887#
222222211112222211122777211127777211278+8721170
22222221111222772222277722227772222772222721280
2222222222222777772227777212277721277721001277#
22222227777722777722777722277772112277211277210
22222777777777222777722112277721112788710010
7777777722227777222277221122222227221127#
77777777222227772211122777211127872111278870
777722222222222222222222112277722227772227721278+870
2222222222222222112277722277772112788772220
222222222222222277722277887221278+8721170
77777777777777227777777722277777222777772227770
7777777777777722277887211278+8721128+70
77777777777777777777222777777777777777777777770
777777722777777777777777222788872117888721170
72222777777777777777777277777772222778772227770
2222277777777777777722778887211278+8721128+70
77777777777777777777777777777777777777777777770
777777722227777777777777222788872117888721170
72222777777777777777777222778772222777770
2222277777777777777777722778887211278+8721128+70
77777777777777777777777777777777777777777777770
777777722222222222222788871178++721170
777777777777777777777772222788872127788721270
777777777777777777777772277777772227888721278870
2222222222222222777222778887211278+8721128+870
77227777777777777777777777777777777777777777770
77777772227777722777777777222788871178++821170
77777777777777777777777722278887222788772270
77777777777777777777777222778872227888721178+870
77777777777777777777222778872211278+87211288870
77777777777777777777777227777777722777777777770
77777777777777777777778772227888721178++821170
77777777777777777777777222778877222277777220
222222222222277777777222778772227888721178++70
22222222222222777722277888722278887211278870
22222222222222222222222221227777222277777720
7777772222222222222222221122777221127787210178++70
7707777722222777221122777221127772211227770
77777777777777777222277722112222211277721012#
277707777777777772222777772212277721112787210010
2222227777777222777772227772222222221122220#
2222222077777227777772227777221227772100178820
222222222222277777222277772222777221112770
222222211011222222222777222277722122788711180
22222222111222211112277221122777222788872220
772222222222011111222221122772227787778++7#
222222277772211122222111277722227888722278+870
222227777222207722111227772222777222222280
222222222227777722227772227777211277721017#
22222222222777777707788872227772111222222110
2222222227777777888877227772111222211127721#
22222227777222278880777777221127772111222210
222227777222277772222777222777222222127#
777777722227722111202221277772222777211280
777777222277221112222111227772227777788720
777722227722111222211102772227777278++8#
77222227722112227722227772112278777777770
2222222222222277772277877201227777777210180
22222222222277777778887222777222277221270
2222222222277777778887227788807222221127772#
22222222778777777777722278887722772211127872#
77722277777227772227777222777722270722272120
777777887722277722277722112277727787210180
777777772222777222277211122722770877277880
7777772222777222277722112277222777278++8#
77772222277222277221122777222772220888710
77222222777222277222277722277722277222772117+
22222277722227772227788872277722277210027#
22227777222777222788877222777222772112777#
2227777222777222788877227772227721227872#

```

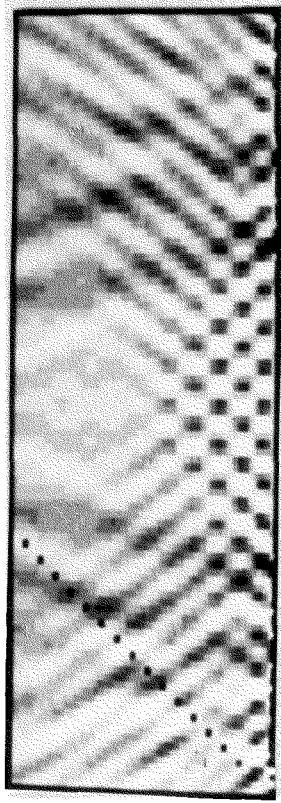
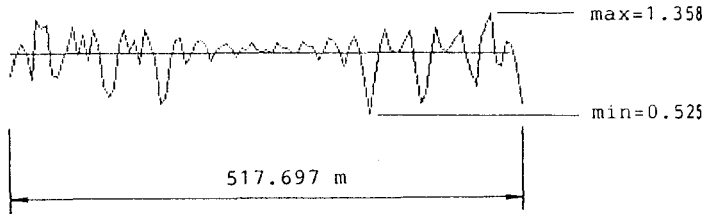


写真-3.2 波高分布の濃淡表示



構造物直後の波高分布

Symbol	Wave height
0	0.525-0.664
1	0.664-0.803
2	0.803-0.942
7	0.942-1.080
8	1.080-1.219
+	1.219-1.358

図-3.68 A-a- α 型の蔽密解
 (島直径D=150m、l=103.5m、
 円柱本数26本、使用円柱径=4m)

これまでA型の再生例が示されたので、B型の配列例（図-3.32、図-3.33、図-3.34）に対して再生計算を行う。図-3.32に対する結果を図-3.69に、図-3.33に対する結果を図-3.71に、図-3.34に対する結果を図-3.73にそれぞれ示す。

ホログラム波高としては図-3.32であり、直径100mの円形波浪制御領域の中心から $l=103.5$ m離れた観測線上での波高分布である。使用円柱径が4mの場合に比べて円柱径をさらに大きくすれば円柱間距離が同じ場合には円柱と円柱の間のスリット間隔は小さくなる。円柱間のスリット間隔が十分小さい場合は小さくなればなるほど波を透過しにくくなる。このことからホログラム型波浪制御構造物のスリット間隔の小さい部分に対する構造物直後の波高分布は小さくなると考えられる。円柱径を半波長程度に大きくしてみた。円柱1本（直径=12.326m）のポテンシャルの重ね合わせ方法で波浪制御構造物背後の波高分布を求め、図化したのが図-3.69である。写真はその濃淡16段階表示である。円柱間距離は表-3.6に示す。

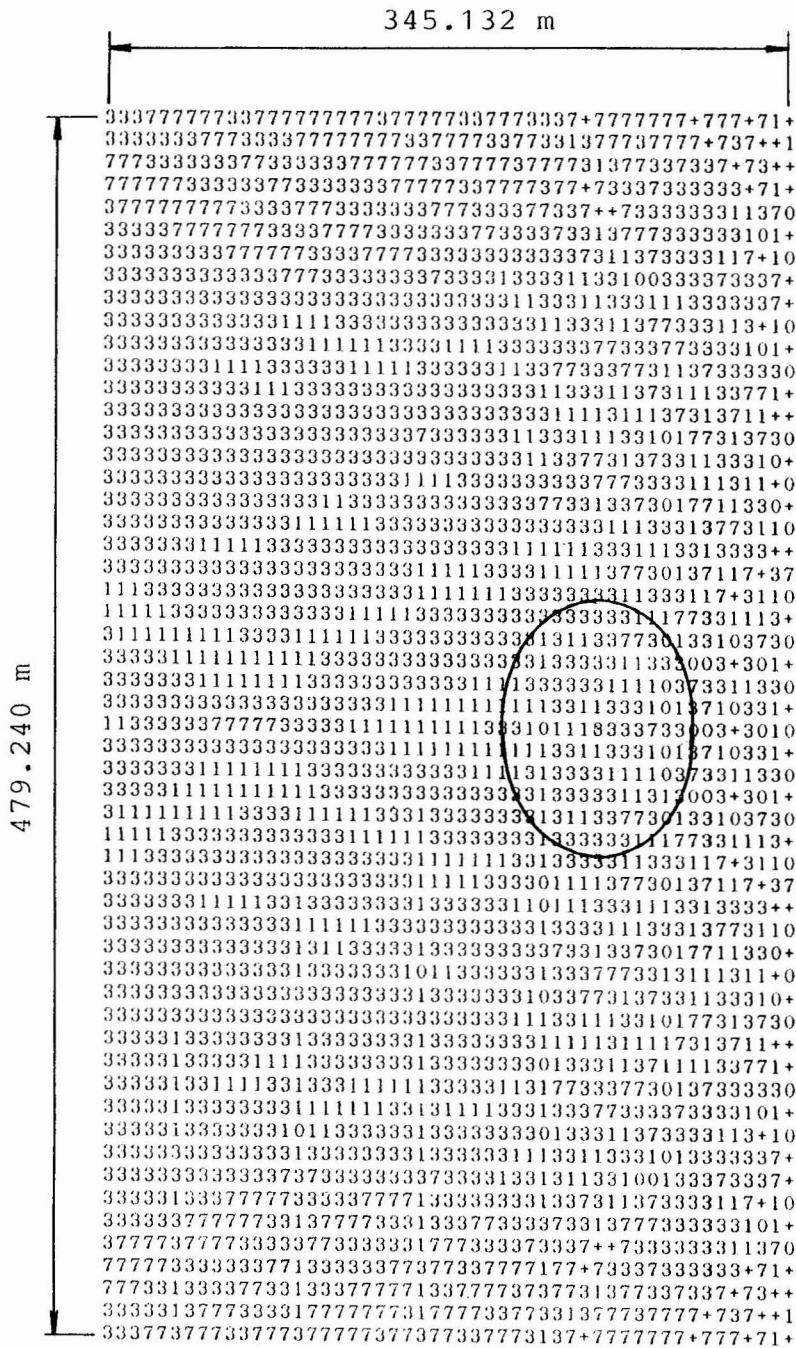
厳密解を同様の16段階濃淡表示したのが図-3.70である。

ホログラム波高中央部の低い部分に対して円柱配列をより密に配列するとどうなるかを調べる。ホログラム波高は図-3.33である。円柱配列例として図-3.34のように中央のやや密に配列された部分に対し、さらに円柱と円柱の間に1本ずつ増やすことにより密にして、中央部の透過波をさらに小さくしようとする。円柱1本（直径=12.326m）のポテンシャル重ね合わせ法で波浪制御構造物背後の波高分布を求め、図化したのが図-3.71である。写真はその濃淡16段階表示である。円柱中心間距離を表-3.7に示す。

厳密解の結果を図-3.72に示す。

B-a- α 型配列例として円柱間隔をさらに小さくし、円柱本数を多くした配列例が図-3.34である。円柱間隔は表-3.8に示す。この配列例に対しては厳密解は円柱間隔が小さすぎるので解が収束しないため厳密解を示すことができない。ポテンシャルの重ね合わせ解のみを図-3.73に示す。

円柱が最も密に配列されている場所での円柱間の最小スリット間隔は4.874mである。



Symbol	Wave height
0 ...	0.953-0.966
1 ...	0.966-0.979
3 ...	0.979-0.992
7 ...	0.992-1.005
+ ...	1.005-1.018

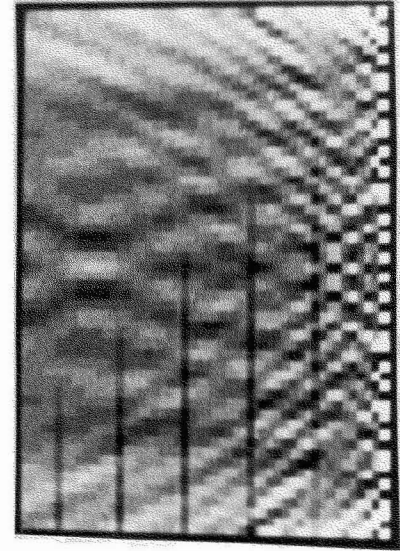
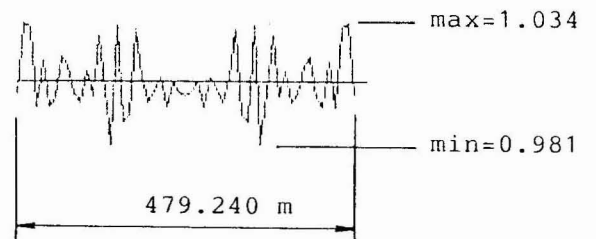


写真-3.3 波高分布の濃淡表示



構造物直後の波高分布

図-3.69 B-a-α型配列例(円柱21本)の場合の構造物背後の波高分布ポテンシャル重ね合わせ法による。(記号表示)
(島直径D=100m、l=103.5m、円柱本数21本、使用円柱径12.326m)

172.565 m

443.741 m

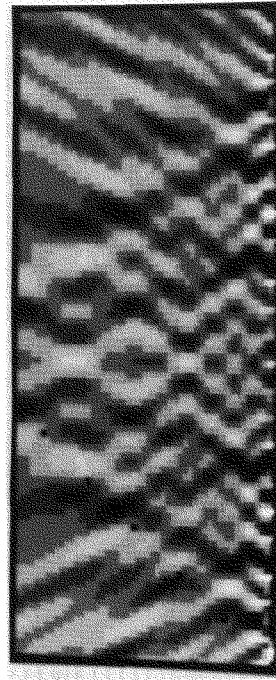
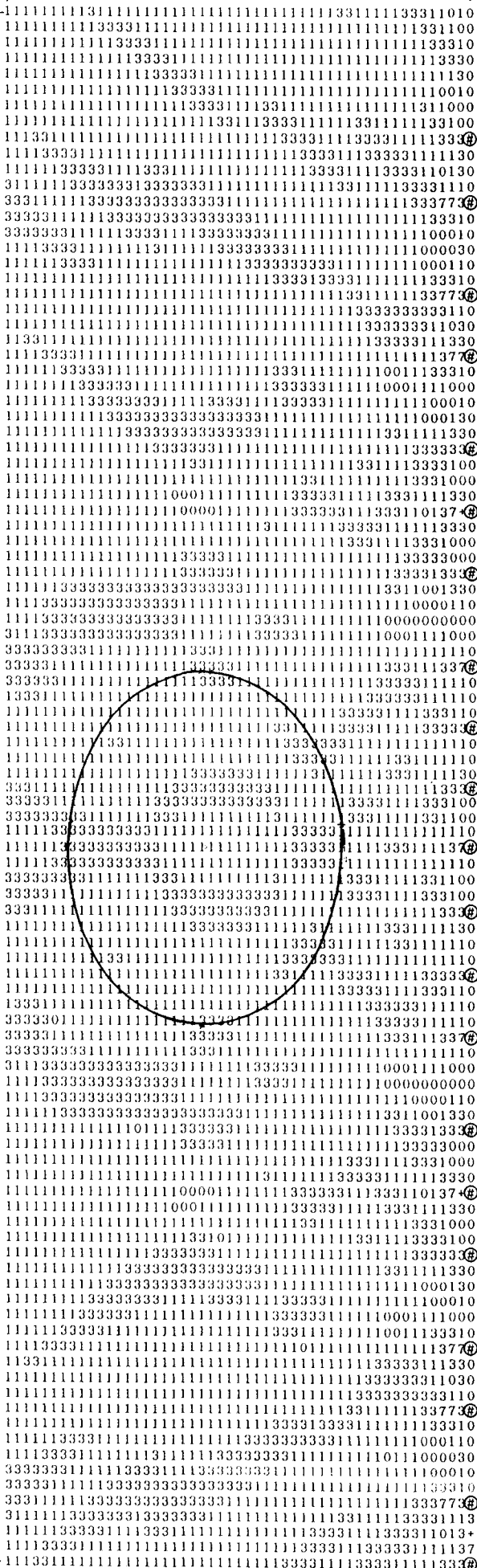
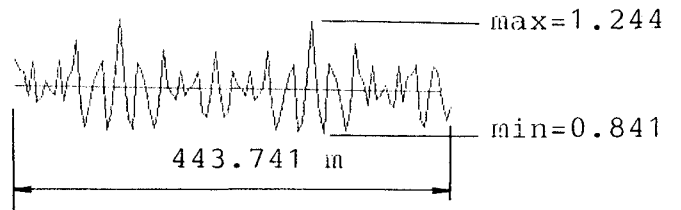


写真-3.4 波高分布の濃淡表示



構造物直後の波高分布

Symbol	Wave height
0	... 0.841-0.932
1	... 0.932-1.024
3	... 1.024-1.115
7	... 1.115-1.206
+	... 1.206-1.298

図-3.70 B-a-α型配列例(円柱2
1本)の場合の構造物背後の波高分布

厳密解。(記号表示)

(島直径D=100m、l=103.5m、

円柱本数21本 使用円柱径=4m)

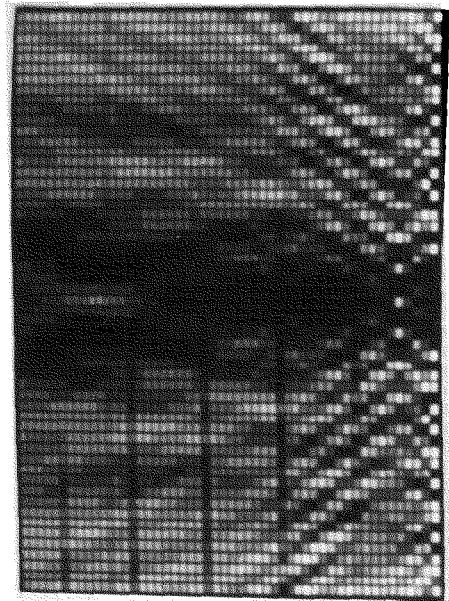
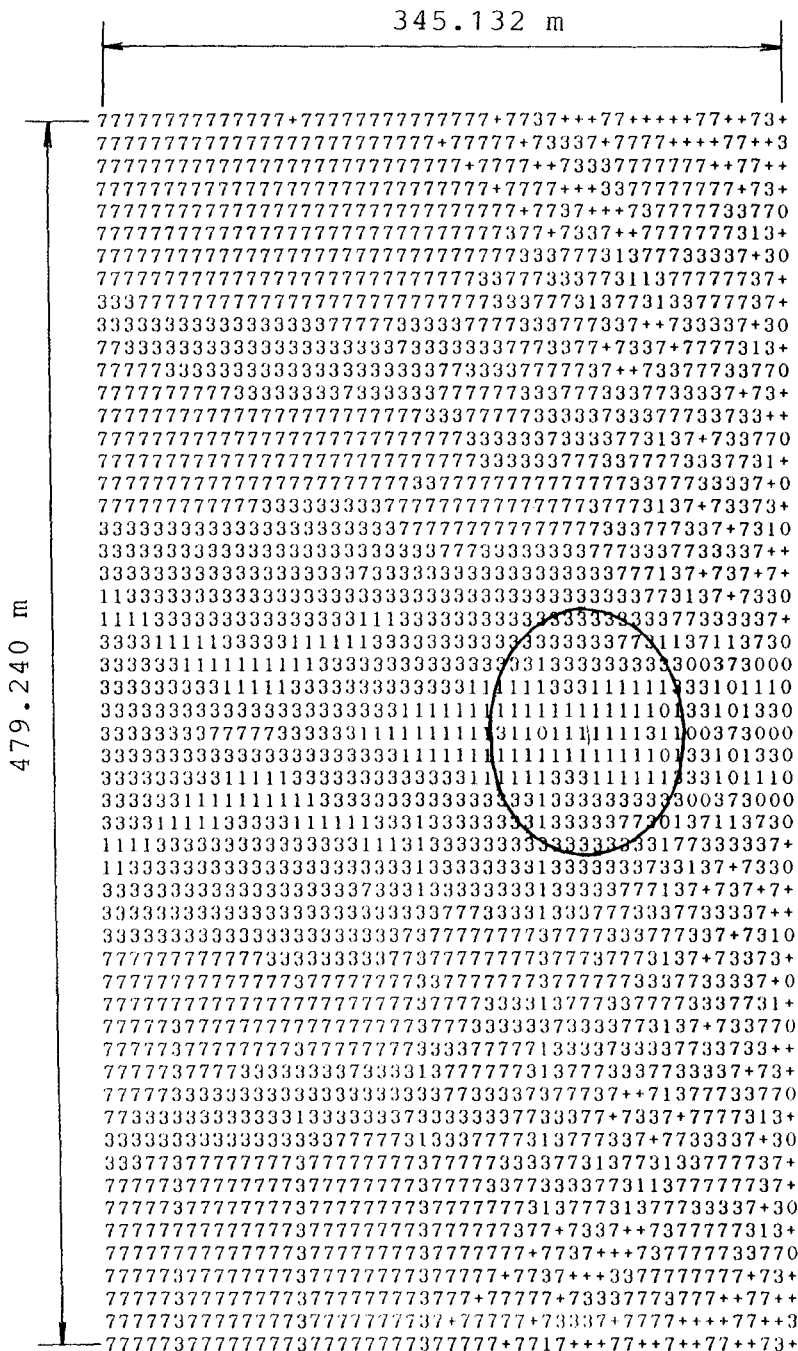
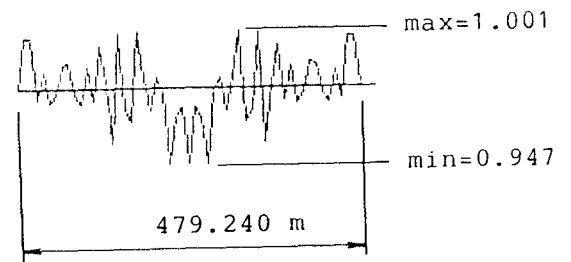


写真3.5 波高分布の濃淡表示



構造物直後の波高分布

Symbol	Wave height
0	0.942-0.957
1	0.957-0.971
3	0.971-0.985
7	0.985-0.999
+	0.999-1.013

図-3.71 B-a- α 型配列例(円柱25本)の場合の構造物背後の波高分布
ポテンシャル重ね合わせ法による。(記号表示)
(島直径D=100m、 $l=103.540$ m、
使用円柱径=12.326m)

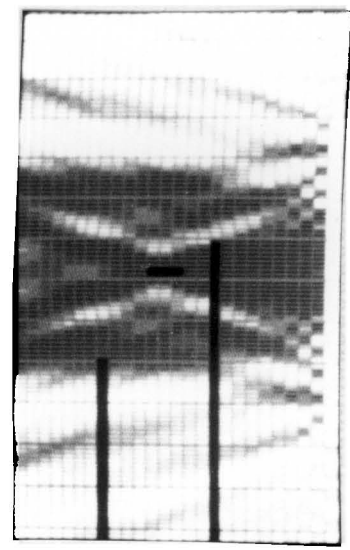
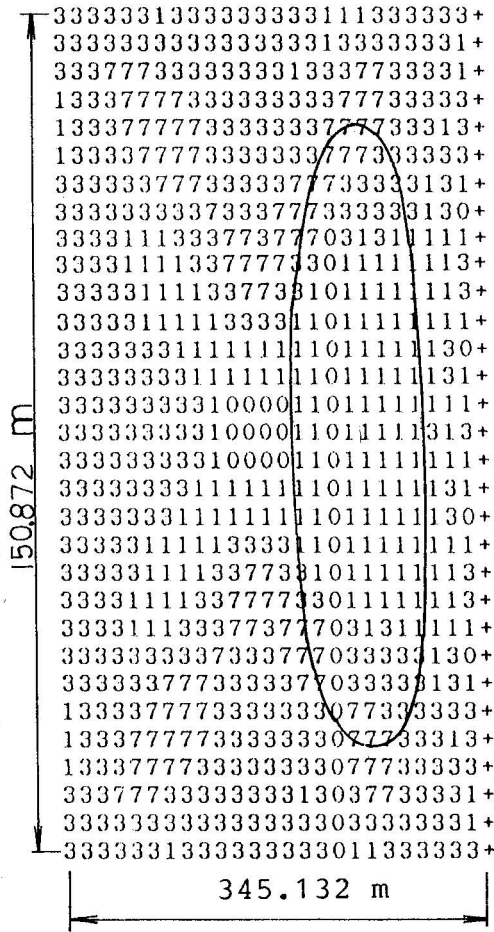
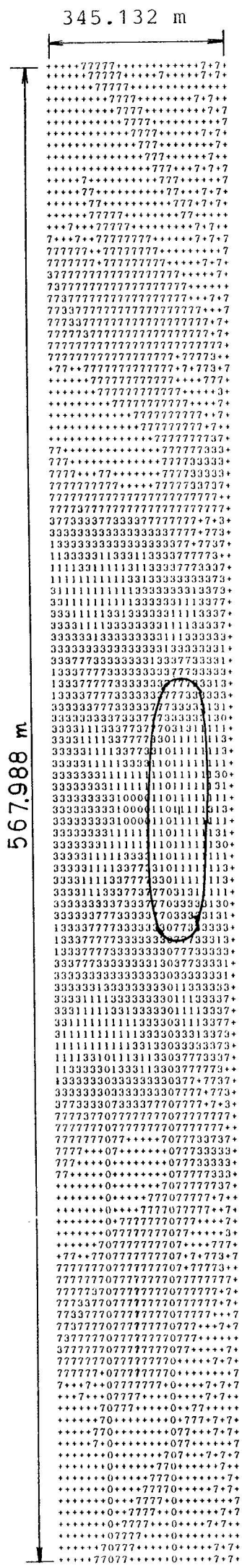
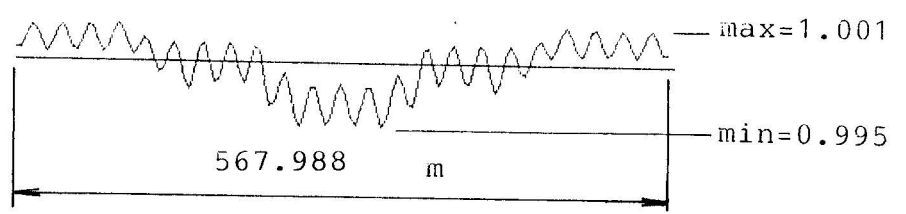


写真-3.7 波高分布の濃淡表示



構造物直後の波高分布

Symbol	Wave height
0	0.994-0.995
1	0.995-0.997
3	0.997-0.998
7	0.998-1.000
+	1.000-1.001

図-3.73 B-a-α型配列例(円柱45本)の場合の構造物背後の波高分布 ポテンシャル重ね合わせ法による。(記号表示) (島直径D=100m、l=103.540m、使用円柱径=4m)

3.6.4で述べた検討例2)のaかbのどちらが適当かを考察する。今までの例からB型の方が適当であろうと理解できるので、B型で検討する。B-a- α 型の配列例が図-3.32、33であり、B-b- α 型の配列例が図-3.35であるのでこれらの配列例に対する再生例を比較する。

ホログラム波高の中央部分の狭い範囲を使用して円柱群の配列を決定したのが図-3.34である。円柱間隔は表-3.9である。

再生結果としてポテンシャルの重ね合わせ解を図-3.74に、厳密解を図-3.75にそれぞれ示す。

3.6.4で述べた検討例3)を考察する。配列に使用するホログラム波高の位置はどのあたりが適当かについて検討する。

今までは図-3.25の中で示されるa), b), c)のb)の場合($l=103.5\text{m}$)に限って検討してきた。b) ($l=103.5\text{m}$)とc) ($l=172.566\text{m}$)のどちらをホログラム波高にするかで円柱配列も変化する。それが再生にどう影響するかを検討する。b)の $l=103.5\text{m}$ の場合の配列例は図-3.32とか図-3.33などで示した。c)の配列例は図-3.25から考えるとb)の場合に比べて基準波高値より低い部分が中央より片側の半分で考えれば1箇所少なくなる。これは基準波高値より低い部分が長くなることであるから、b)に比べて円柱配列数を多くしなくてはならないことに相当する。

このことは基準波高値の選び方にも関連するので、一概には言えないがより粗密が細かく表現される方が好ましいと言えるだろう。

3.6.4で述べた検討例4)を考察する。島直径と波長の関係を調べる。

島直径Dに対する波長Lの比を、Dのみを変化させて $D/L=4.06$ と 0.81 の2種類について再生状況を比較する。 $D/L=4.06$ の場合の円柱配列例は図-3.32から3.34までであり、再生例が図-3.69から73までである。 $D/L=0.81$ の場合の円柱配列例は図-3.37で、再生例はポテンシャルの重ね合わせ解のみを図-3.76に示す。

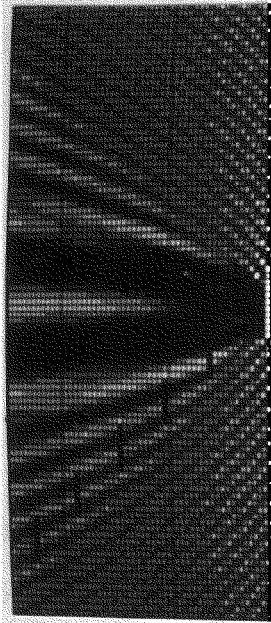
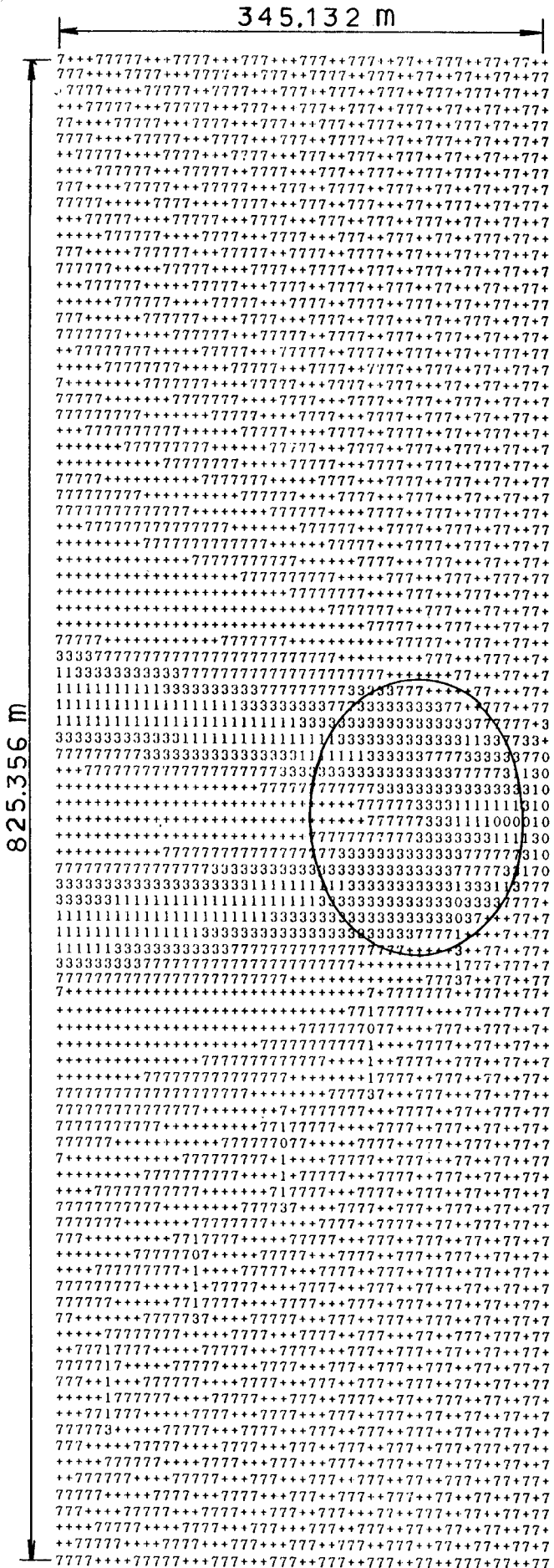
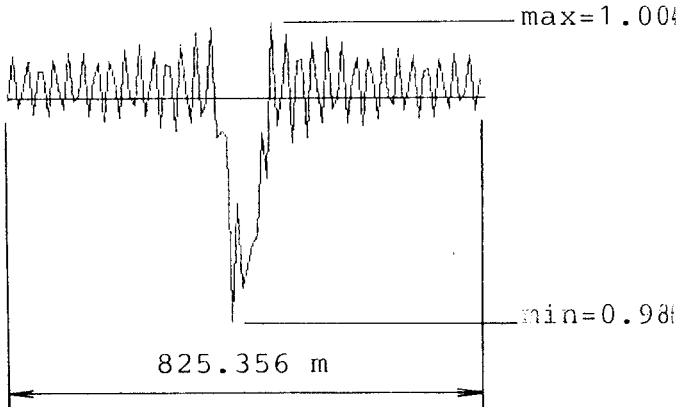


写真-3.8 波高分布の濃淡表示



構造物直後の波高分布

Symbol	Wave height
0	0.981-0.987
1	0.987-0.993
3	0.993-0.999
7	0.999-1.005
+	1.005-1.010

図-3.74 B-b-α型配列例(円柱12本)の場合の構造物背後の波高分布
ポテンシャル重ね合わせ法による。(記号表示)

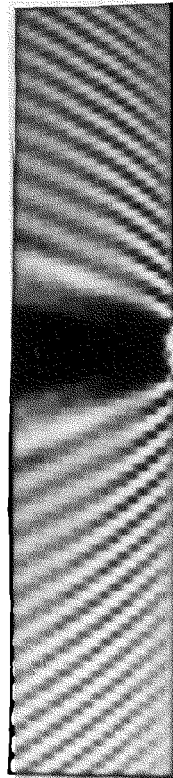
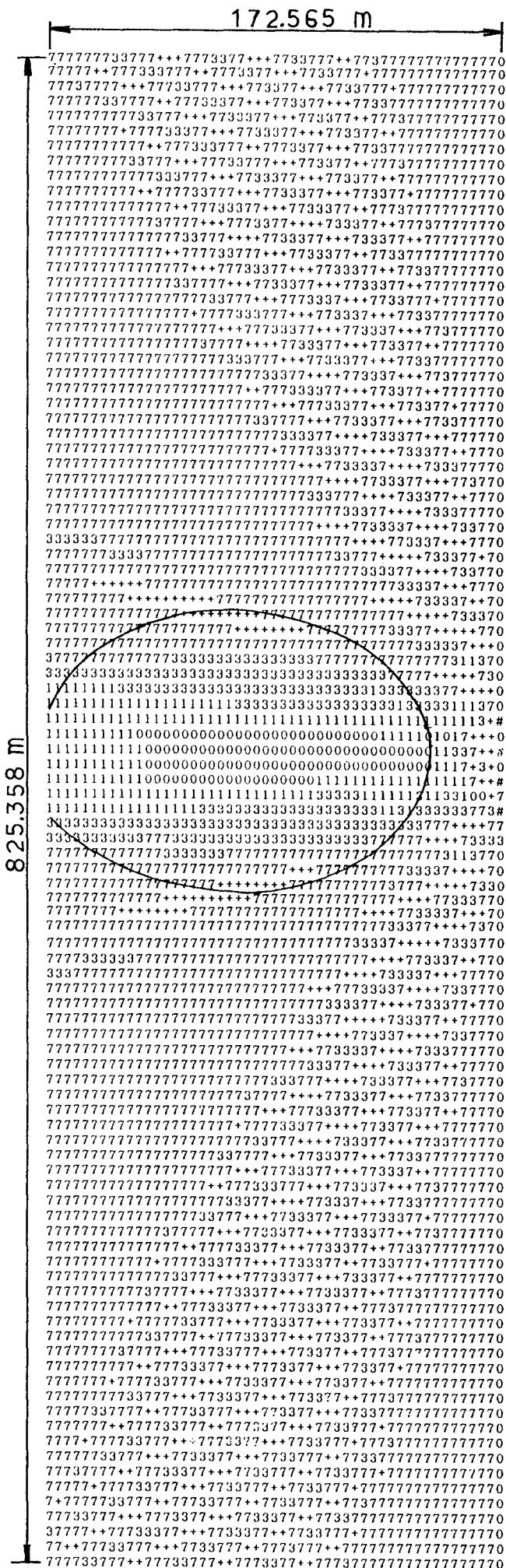
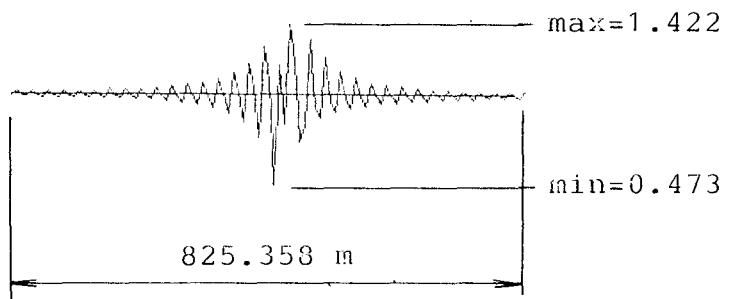


写真-3.9 波高分布の濃淡表示



構造物直後の波高分布

Symbol	Wave height
0	... 0.341-0.530
1	... 0.530-0.718
3	... 0.718-0.907
7	... 0.907-1.096
+	... 1.096-1.284

図-3.75 B-b- α 型配列例 (円柱1
2本) の場合の構造物背後の波高分布
厳密解。(記号表示)

345.132 m

MAX= 1.002 MIN= 0.991

585.738 m

141.997 m

00000011133111337333333773+

0000000011331113333133333+

000000001133111111133113+

00000000011333101113111033

00000000001133100013111137

000000000001110001110133+

1111000110000111001111173+

3111111110000011110011373+

3333311111000001310013333+

333333111100001311113311+

777733311111001113333310+

777773333113110013731110+

7777733333333331013731011+

337777733377733013331011+

333337777777777703111111+

3333337777777777031001110+

333333777+7777+031001110+

3333337777777777031001110+

333337777777777703111111+

33333777777777773013331011+

777773333113110013731110+

7777733333333331013731011+

7777733331113110013731110+

333333111100001011133311+

333331111000001010013333+

3111111100000110011373+

11110001100001100111173+

00000000000110001110133+

000000000113310001311137

000000000113311011311033

000000000113311011133113+

000000001133113033133333+

0000001133113303333773+

0011111331113703333773+

1111133331137077733773+

11333333311337307777733+

333333333113373077777313+

33377733337733077773111+

777773333773303333111+

777773077773303331333+

77777307+7333031111337+

7777770+73373011101337+

+777770+73373011113373+

77777+0+733733011133333+

77777+0733773303333331+

77777+03337733033733313+

7777+703377333077+73313+

7777730337733707+73773+

7777330373337707733773+

7773313073337707737773+

3331337033377703377737+

33113770337777303377337+

3113770377773303773377+

133777077773303733377+

333773077733307733777+

37777307773333073337+7+

7777730773333073777+7+

7773770733337703377+77+

7733770333777707+777+

733773033777707+7777+

73377303777+770+77777+

337733307+77+0+777777+

7773370+777+07777777+

77737+0+777+07777777+

7777+0+777+0777+7777+

777+0+777+7077777777+

777+0+777+73077+77777+

77+0+0777+73077777777+

7+0+70777+73307+777777+

+0+707777370777777777+

+0+770777737+077777+7+

+0+777077737+077777777+

+7777077777+7077777777+

+7777077777+7077777777+

77377707777+77077777777+

33777707777+77777777777+

337777077+77777777777+

377777077+77777777777+

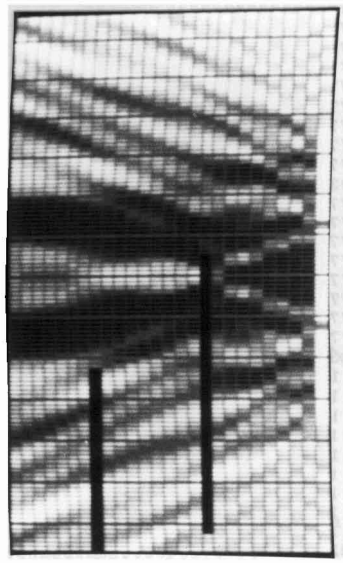
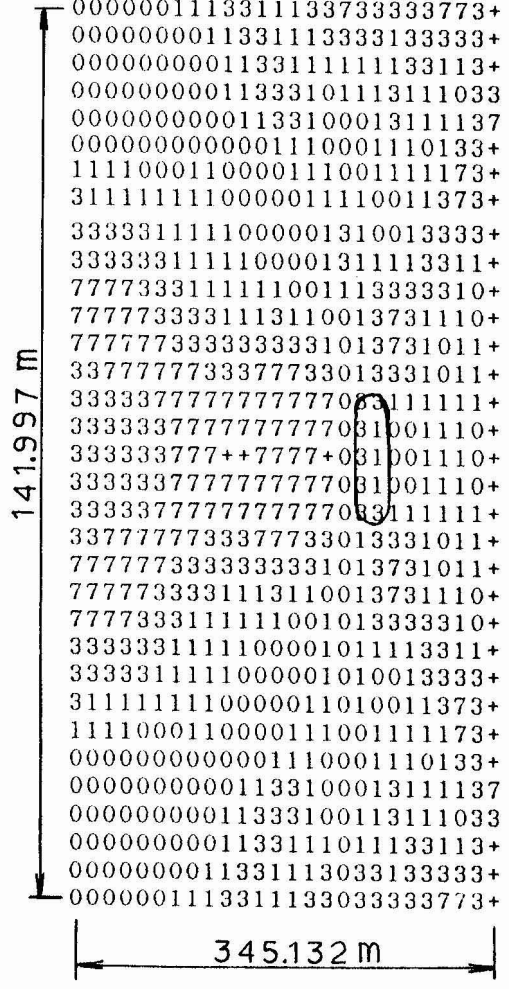
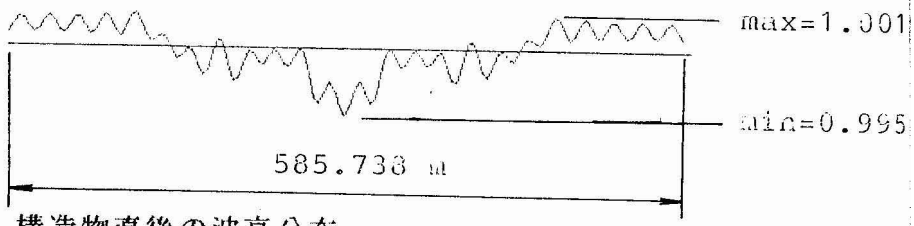


写真-3.10 波高分布の濃淡表示



構造物直後の波高分布

Symbol	Wave height
0	0.994-0.996
1	0.996-0.997
3	0.997-0.999
7	0.999-1.000
+	1.000-1.002

図-3.76 B-a-α型配列例 (円柱37本)

の場合の構造物背後の波高分布

ポテンシャル重ね合わせ法による。(記号表示)

3. 7. 3 ポテンシャルの重ね合わせ解における特殊な操作

ホログラム波高は中央で低くなっているから波浪制御構造物としては中央に一文字堤のような構造物が望ましいことがわかる。円柱間のスリット間隔を小さくすれば波を透過しない一文字堤に近くなるであろう。一文字堤の場合の回折波計算は楕円の長軸を大きく、短軸を小さくすることで解析解を得ることも可能であるが、ここでは円柱背後の回折領域が強く影響するように、ポテンシャルを重ね合わせる際に倍率をかけてポテンシャルの平均値とする方法を試みた。したがって理論解との比較はできない。

倍率をかける範囲として円柱中心からY方向に $\pm 5 \Delta y$ の範囲に対しては3倍の倍率をかけた。 Δy とはy方向の計算分割幅である。

図-3. 77に結果を示す。この図からわかるように、円柱の影響を強くするための倍率を全円柱にかけているため全体にわたって波が抑え込まれている。このことから一文字堤の効果を表すにはポテンシャルに倍率をかける操作を一文字堤の部分に限って適用すればよいことになる。このようにした結果を図-3. 78に示す。図-3. 77に比べて図-3. 78では中央部での波高が強く抑え込まれ円形状の波浪制御領域が認められる。

3. 7. 4 円形島2箇所の場合の再生

式(3. 48)を使って求めた円形島2箇所のホログラム波高は図-3. 27である。円形島2つに対応して波高の低い部分が2箇所現れている。再生(波浪制御)したい領域と波浪制御構造物との距離 $l = 332.806\text{ m}$ とする。この距離はホログラム波高を求める段階であらかじめ指定しておく必要がある。円形島の直径は 100 m であり、両円形島の中心間距離は 690.264 m である。

求められたホログラム波高を円柱群を用いたホログラム型波浪制御構造物に変換する。ここでは前節での結果を考慮してA-a- α 型に変換する。その1例が図-3. 42である。使用円柱杭の直径は 4 m である。

変換されたホログラム型波浪制御構造物に来襲波浪を想定した規則波を入射させて波浪制御状況を確認する。この規則波の諸量としては、前節と同様に波高 $H = 1$ 、周期 $T = 4\text{ sec}$ 、波長 $L = 24.652\text{ m}$ 、水深 $h = 10\text{ m}$ を想定している。波高分布の計算は式(3. 64)と式(3. 48)で求める。求められた波高分布を記号化したのが図-3. 79である。ホログラム波高と波浪制御構造物直後の波高分布とを比較したのが図-3. 59である。

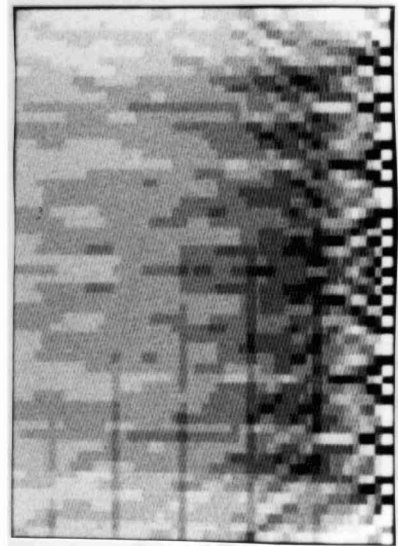
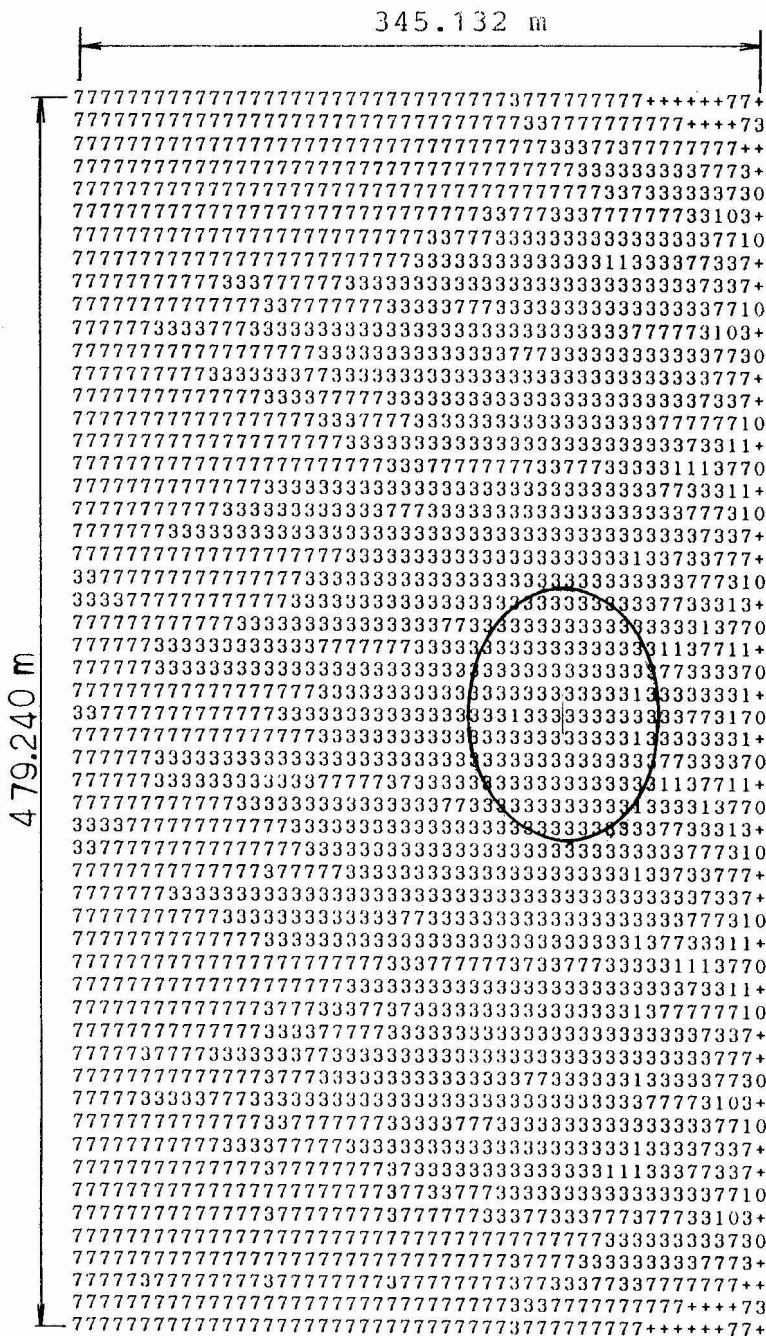
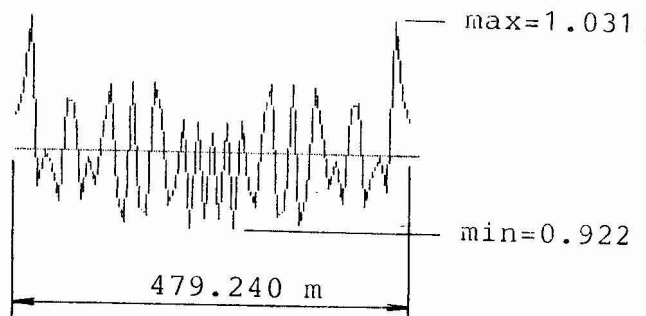


写真-3.11 波高分布の濃淡表示

Symbol	Wave height
0 ...	0.882-0.912
1 ...	0.912-0.942
3 ...	0.942-0.971
7 ...	0.971-1.001
+ ...	1.001-1.031



構造物直後の波高分布

図-3.77 B-a- α 型配列例(円柱21本)の場合の構造物背後の波高分布
(島直径D=100m、 $l=103.5$ m、
使用円柱径=12.326m)

3. 7. 5 配列粗な円柱の影響の程度

円柱配列は大きく分けて中央の密な部分とその外側の粗な部分に分けられる。この外側の粗な部分の波浪制御（再生）への影響について1例について確認した。まず外側の粗な円柱群のない場合とある場合とで波浪制御状況がどう違うかを調べる。両者の波浪制御状況を比較したのが図-3.80である。

3. 7. 6 各種仮定の検討

3. 7. 6. 1 インラインホログラフィとの比較

数値計算ホログラフィでは参照波が完全透過するとして計算した。水面波ホログラフィにおいても、数値計算ホログラフィと同様に入射波が完全透過すると考えることもできる。それは入射波のポテンシャルを散乱波のポテンシャルとを足し合わせてポテンシャルを求めることもできる。

入射波のポテンシャルは(3-50)式で計算できる。これを前節までに計算したポテンシャルに加えればよい。そのようにして求めたポテンシャルを用いて、波高を(3-48)式で計算し、ホログラム波高を求めたのが図-3.29である。得られたホログラム波高を3.6で述べた考え方に従ってホログラム型円柱群の配列を決定する。その例が図-3.41である。円柱中心間距離を表-3.12に示す。

この円柱群配列に入射波をあてて再生過程を実施する。波高分布をいままでと同様の数値記号で表したのが図-3.81である。円形島に相当する再生領域を図中に実線で示す。この領域内では波高は10~20パーセント程度低減されている。また数値記号"2"が再生領域をとりまくように分布していることもわかる。いままでと同様に他にも波高の小さい領域もある。

3. 7. 6. 2 コヒーレンシー

規則波を仮定しているので満足されている。時間的に空間的に一定の波を扱っている。

3. 7. 6. 3 振幅透過率

円柱群構造物がホログラムに透過かどうかの問題

円柱間隔が小さくなると、反射波が大きくなり透過波は全体としては小さくなるが、スリットから通過する波のパワーは単位幅あたりで考えると、必ずしも光の透過率とは同等にならないのではないか。

水面波の場合スリットが小さくなってくるとエネルギー損失が大きく関係してくると思われる。

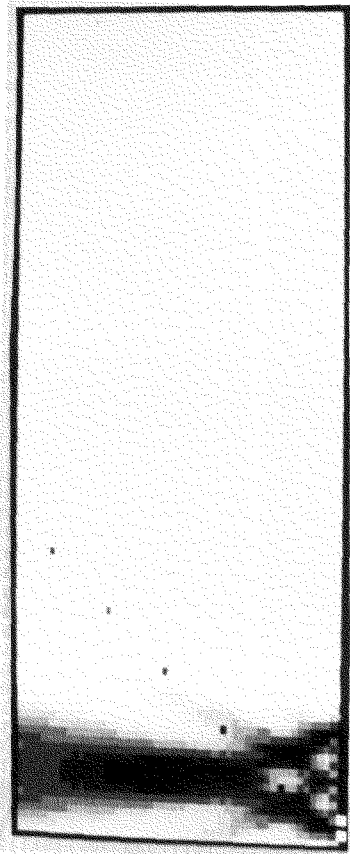
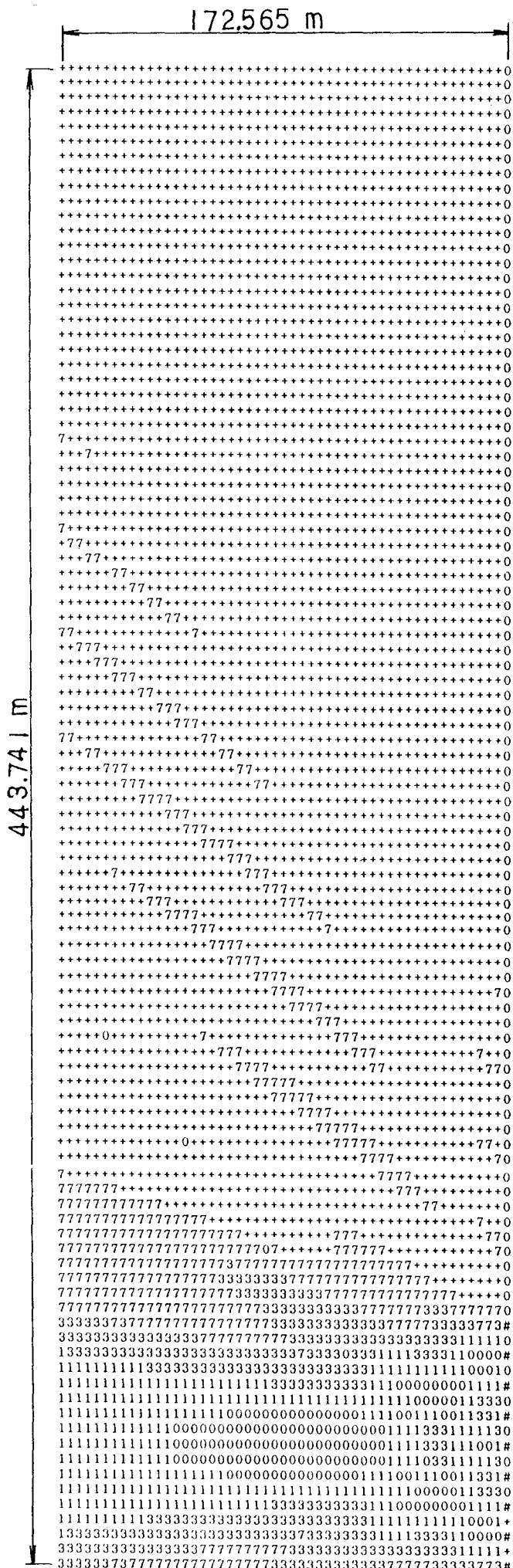
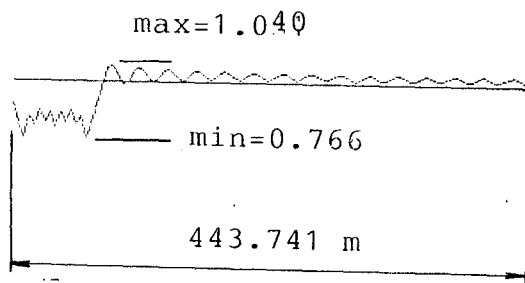


写真-3.14 波高分布の濃淡表示



構造物直後の波高分布

Symbol	Wave height
0	0.732-0.794
1	0.794-0.857
3	0.857-0.920
7	0.920-0.982
+	0.982-1.045

図-3.80 配列粗な周囲の円柱の効果 (厳密解) B-a-α型配列例 (円柱9本) の場合の構造物背後の波高分布 (島直径D = 100m、l = 103.540m、使用円柱径 = 4m)

3-8 結言

1. ポテンシャルの重ね合わせ解は波高分布の最大値と最小値の幅が厳密解のそれに比べて小さい。これはポテンシャルを重ね合わせているため、本来円柱があるべき場所に円柱があるという程度が重ね合わせる円柱本数分の1程度になることによる。
2. ポテンシャルの重ね合わせの誤差が5%程度でもよいとすればポテンシャルの重ね合わせで波高分布を計算できる。
3. 円柱列群の配列方法はB型配列が適当である。
4. ホログラム波高の使用幅は極端に狭くてはいけない。ホログラム波高の中央の低い部分をはさんで左右両側に中央の波高の低い部分（島堤に相当する部分）程度の幅があれば適当であろう。
5. 仮想波浪制御領域として円形島を選べば、ホログラフィ理論を応用した円柱列群による波浪制御領域は円形島の外周に沿った円環領域内で波高が約10%~30%小さくなる。ただしその他の領域でも波高が低い領域はある。
6. 水面波の場合、多数本の円柱がある場合の波高を入射波と各散乱波のポテンシャルの級数和として求める方法は、入射波のポテンシャルを円柱がある場所以外の全領域に足し合わせているので、インラインホログラフィにおける半透明という条件を満たしていることになる。
7. インラインホログラフィの条件として物体が半透明であることを水面波ホログラフィでも満足させるために入射波のポテンシャルをさらに加える方法が考えられる。この方法でも5.と同様の結果が得られた。
8. 振幅透過率の問題としては、円柱列間のスリット間隔が小さくなると円柱列間での乱れによるエネルギー損失を考慮した検討が必要となる。
9. インラインホログラフィの項で述べた通り、ホログラムから透過する光は(3-5)式に示されるように0次透過光など4項の波が存在する。これら4項の波のエネルギーが相等しいと考えると、物体光のエネルギーは全体の1/4に相当する。ホログラフィ理論を応用した波浪制御ではこの物体再生波の分を制御するのであるから最大25%の波浪制御が原理上可能となる。4.で述べた10~30%の波浪制御はこの最大25%にほぼ近い値を確認し得たことになる。

以上項目別に述べたが、全体としては単列のホログラム型円柱群によって、希望する領域の波高を約10～30%程度低減させることは可能であるが、このままでは消波構造物としては十分なものとは言いがたい。多数列構造とするような検討が必要になる。

参考文献

1. 檀和秀・篁源亮：計算機ホログラフィの海岸構造物設計への応用，流れの可視化，Vol.9, pp.65-70, 流れの可視化学会，1989.
2. Max Born and Emil Wolf (草川徹，横田英嗣共訳)：光学の原理Ⅱ 干渉および回折，pp.568-589, 東海大学出版会，1975.
3. L. P. Yaroslavskii and N. S. Merzlyakov (Translated by Dave Parsons):Methods of Digital Holography, Consultants Bureau, pp.1-18, 1980.
4. 檀和秀：ホログラフィ理論を海岸構造物の設計に応用する場合の条件について，明石工業高等専門学校研究紀要第32号，pp.57-63, 1990.
5. 檀和秀・篁源亮：数値計算ホログラフィー1次元物体に対するインラインホログラフィ，明石工業高等専門学校研究紀要第35号，pp.37-46, 1993.
6. 菅原一晃・小舟浩治・佐々木弘・橋本典明・亀山豊・成田明：沿岸波浪観測15か年統計（昭和45年～昭和59年），港湾技研資料No.554, 運輸省港湾技術研究所，1986.
7. 小舟浩治・亀山豊・菅原一晃・橋本典明：沿岸波浪観測年報（1988），港湾技研資料No.666, 運輸省港湾技術研究所，1990.
8. 運輸省第三港湾建設局神戸工事事務所編，要覧，昭和58年.
9. 鋼管杭協会技術サービス分科会編：鋼管杭ーその設計と施工ー，鋼管杭協会，1984.
10. 田中潜：円柱状の島による波の回折，応用水理学 中Ⅱ，pp.538-539, 丸善，1958.
11. 檀和秀・篁源亮：ホログラフィ理論の海岸波浪制御への応用について，可視化情報，Vol.10, Suppl., 1990.
12. K.Dan and M.Yano:Study of Holography Applied to the Piles Structure for Wave Dumping in Sea Shore, Proceedings of the Sixth International Symposium on Flow Visualization, pp.363-367,1992.
13. 渡部力・名取亮・小国力：数値解析とFORTRAN 第3版，pp.98-135, 丸善，

1988.

14. 檀和秀・筧源亮：ホログラフィ理論を基礎にした海岸波浪制御について，可視化情報，Vol.11, Suppl., pp.109-114, 1991.
15. 檀和秀：海岸波浪制御構造物としての鉛直円柱群の配列決定方法について，明石工業高等専門学校研究紀要第34号，pp.47-64, 1992.
16. 檀和秀：円柱群による海洋回折波の特性と海岸波浪制御，明石工業高等専門学校研究紀要第33号，pp.51-68, 1991.

第4章 水槽実験

4.1 緒言

波浪制御状況は反射率、透過率、エネルギー損失率を合わせて消波性能を評価することが多い。本章では透過波高を円柱群構造物の背後で測定し、どのように波浪制御されているかを調べる。

平面的な波高分布を調べるには、波高計を多数点に設置して同時に多数点で計測する方法が採用されている。本実験では用意できる波高計の数が1台と限られるため、定常性を確認して、波高計を順次移動させて測定し、平面的な波高分布を計測する方法をとる。

2.3ですでに述べたように鉛直円柱杭を並べて波浪制御しようとする試みは古くからある。しかし配列の仕方は等間隔であったり、多数列配列も一様配列、千鳥配列だけであった。

第3章でホログラフィ理論を基礎にした鉛直円柱群配列による波浪制御構造物を決定する手法を示し、理論解析を重ねてきた。その決定された構造物に対し模型実験を本章では実施している。

4.2 水槽実験^{1), 2), 3)}

4-2-1 実験装置

第3章4節で決定した円柱配列に対し縮尺1/240で模型実験をおこなった。装置の大きさは図-4.1の通りである。実物円柱径を4mとすると模型円柱径は6mmとなる。実物水深を10mと考えると模型水深は4cmとなる。フルード相似則から実物周期4秒に対する模型周期は0.258secとなる。

波起こし装置は水底単ヒンジのフラッター型である。モーターの回転軸に回転用円盤(直径86mm)を直接取り付けて回転させ、波起こし板の往復運動に変換させている場合と、モーターにギアヘッドを取り付けて安定したトルクが得られるように改良している

場合とがある。

実験水槽の岸側にはナイロン網で作られた厚さ約2 cmのネットを波消し装置としている。

円柱には木製の円柱を使う。

波高計はサーボ式の波高計（計測技研製 SH201、SHT2-60）を使用した。記録は波高計からの出力を記録計に出力させ記録紙から読みとる場合と、波高計からの出力電圧をAD変換（AD変換用ボード カノープス電子製 Analog Pro. jr.）しパソコンで処理するという場合の2種類の方法をとる。

図-4.1のような水槽（幅80 cm、長さ179 cm、高さ10 cm）に鉛直に円柱を設置して実験する。

本装置の性能は

周期	0.03 sec 程度
波高	1 cm 程度
水深	5 cm
波長	10 cm程度

である。ただ周期については小周期の場合はばらつきが大きくなり望ましくない。

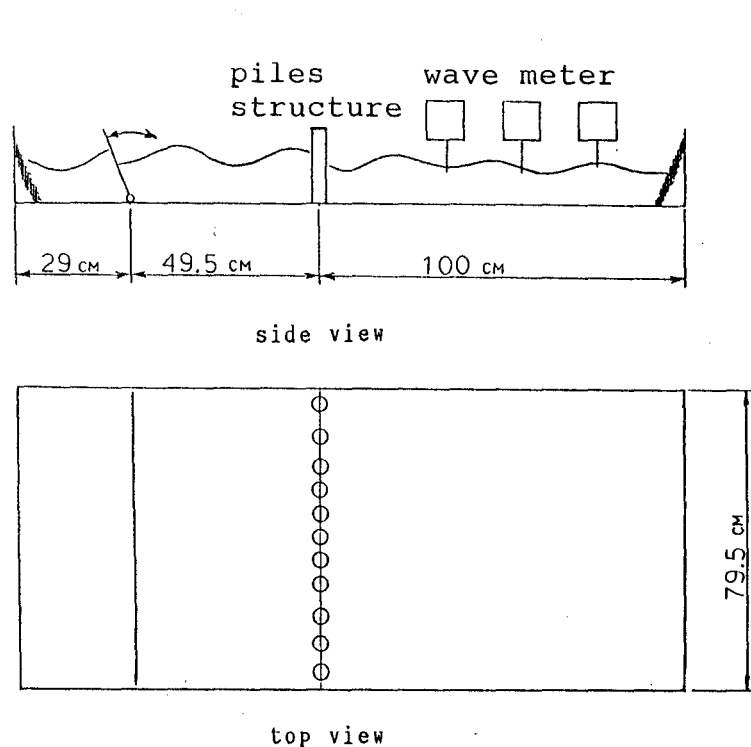


図-4.1 実験装置

4-2-2 実験方法

4-2-2-1 相似則

原型時間 t_p に対する模型時間 t_m の比である時間縮尺を $K_t = \frac{t_m}{t_p}$ とすると、フルード相似則から

$$K_t = \sqrt{K_l} \quad (4-1)$$

ただし原型と模型の寸法比である縮尺を $K_l = \frac{l_m}{l_p} = \frac{\text{模型寸法}}{\text{原型寸法}}$ とする。

実験では波の回折理論の項で述べた条件を模型で調べることにする。周期は4秒程度とし、水深は10m程度とする。この条件をいくつかの縮尺で模型実験するときの模型周期と模型水深の例を表-4.1に示す。

表-4.1 模型水深

縮尺 K_T	模型円柱径	模型水深	模型周期
1/200	2 cm	5 cm	0.283 sec
1/250	1.6	4	0.253
1/300	1.3	3.3	0.231

フルード相似則からは以上の表-4.1のように決まるのであるが、実際は既製の円柱径（直径1.7cm）を利用する関係上なるべく近い条件で実験することになる。

4-2-2-2 実験方法

まず周期は波起こし板の10往復に要する時間を測定し平均をとって設定周期とする。計測機器から算定される周期が正しいかどうかをストップウォッチで計る平均周期と比較して確認している。

水深、周期が同じ場合は、波高のほぼ同じ波を発生してくれることは確認している。

波高の測定については以下の2種類の方法を実施した。それは

A : 波を静水面の状態から第20波程度まで連続測定する

B : 波を起こし続けている間のある時間間隔だけを連続測定する。測点を変えるときは波を継続して発生させながら波高計を移動しある時間間隔だけ連続測定する。

4-2-3 実験結果

4.2.3.1 予備実験

使用する水槽の特性をつかむため、予備実験を実施する。水槽の特性とは水路壁での波消し装置による波消し効果、波の進行による進行方向への波高変化である。

波消し効果については波消し装置付近で波高を測定し、波高記録から反射波の程度を判定する。

本実験では定常になった状態で波高計を順次移動させて連続的に計測することとする。以下に周期、波高別に定常かどうかを調べる。

進行方向への周期、波高変化は図-4.2のように波の進行方向にx軸をとり、x軸と直角にy軸をとる。原点は波起こし板から49.5cm離れた水槽の中央にとる。x方向とy

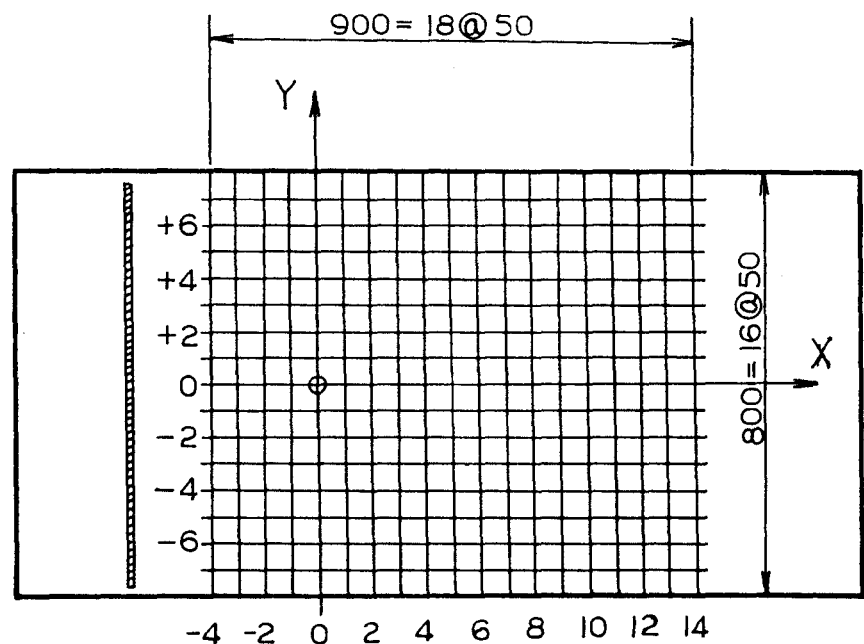


図-4.2 水槽上の座標のとりかた

方向にそれぞれ5cm間隔に格子点をとり、番号を原点で0とし、正の方向に+、負の方

向に-をつけて区別する。

2-2で述べたように水槽の特性を知らねばならない。周期特性については水槽の中央線上 ($y=0$)、左右の線上 ($y=6$ 、 -6)での周期を固定点 ($x=0\sim 14$)で測定し、測定周期の標準偏差を調べて判定する。サンプリング周波数は33.3Hzであり、0.03秒間隔に連続約210個のサンプリングをする。周期の測定結果の多くは0.27secか0.3secのどちらかで、平均値が0.285sec程度になっている。これはサンプリング周期に原因があり、さらに小さい0.01秒程度にすればよいのであるがAD変換ボードを組み込んでいるパソコンがPC9801VM2であることにより、サンプリング周期をこれ以上小さくできなかつた。表-4.2からわかるように各点での周期の平均値は0.285secになっており、標準偏差は0.015sec程度と小さく周期は非常に安定しており定常であると言える。

表-4.2 各点での周期 σ : 標準偏差 単位: sec

測点	(-1,6)	(0,6)	(1,6)	(2,6)	(3,6)	(4,6)	(5,6)	(6,6)	(7,6)
平均	0.285	0.285	0.285	0.285	0.286	0.285	0.285	0.285	0.285
σ	0.016	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
測点	(8,6)	(9,6)	(10,6)	(11,6)	(12,6)	(13,6)	(14,6)		
平均	0.285	0.285	0.286	0.285	0.286	0.285	0.285		
σ	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015		

測点	(-1,0)	(0,0)	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(4,0)	(5,0)	(6,0)	(7,0)
平均	0.284	0.285	0.285	0.285	0.285	0.285	0.285	0.285	0.285
σ	0.015	0.016	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
測点	(8,0)	(9,0)	(10,0)	(11,0)	(12,0)	(13,0)	(14,0)		
平均	0.285	0.286	0.285	0.286	0.285	0.285	0.284		
σ	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.021		

測点	(-1,-6)	(0,-6)	(1,-6)	(2,-6)	(3,-6)	(4,-6)	(5,-6)
平均	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.285	0.285

σ	0.015	0.017	0.017	0.015	0.015	0.015	0.015
測点	(6, -6)	(7, -6)	(8, -6)	(9, -6)	(10, -6)	(11, -6)	(12, -6)
平均	0.285	0.285	0.285	0.286	0.286	0.285	0.286
σ	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.016
測点	(13, -6)	(14, -6)					
平均	0.285	0.285					
σ	0.015	0.015					

波高変化についても同様に $y = 0$ 、 ± 6 の線上で $x = 0 \sim 14$ の各点での連続約 210 波の波高を測定する。サンプリング周波数は 33.3 Hz である。ある点での全測定値の平均値を平均水面としてゼロアップクロス法で波高を計算した。波の進行とともに波高がどう変化するかをみるために、進行方向への平均波高の変化を示したのが図-4.3である。 $y = 0$ 、 $y = \pm 6$ の各線上での波高変化を示す。

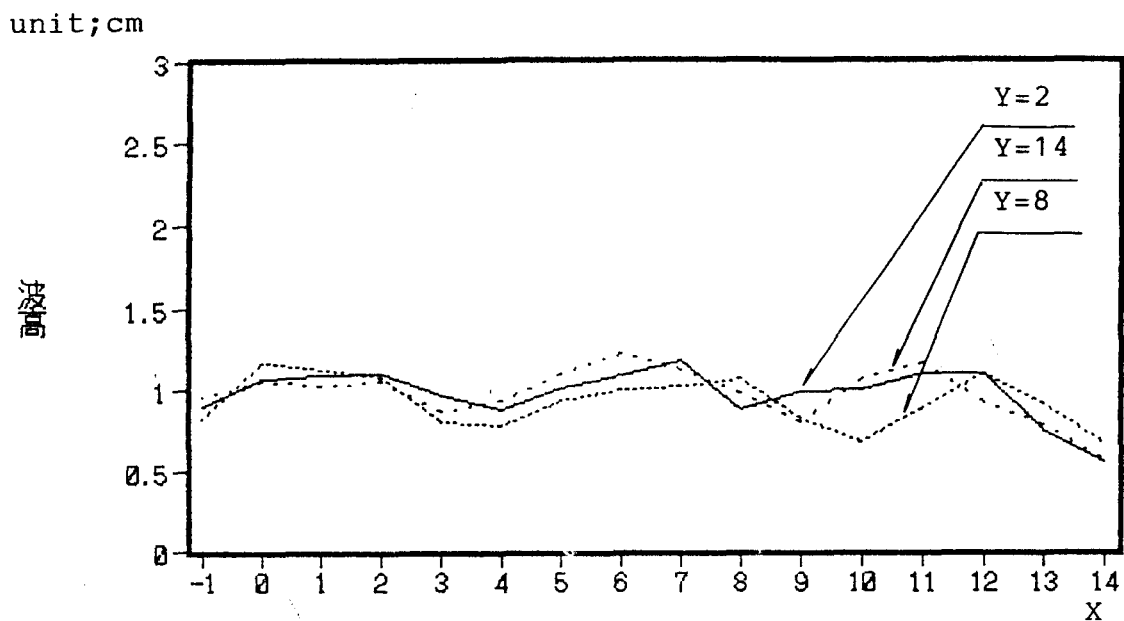


図-4.3 波の進行方向への波高変化

この図から波高は測点 $x = 12$ から 14 で低下することがわかる。これは $x = 14$ の測点

から岸側へ30 cmの距離のところに波消し用の繊維網を置いていることによると思われる。測定で意味があると思われるのは $x = 1$ 2 までの範囲と考え実験を実施した。

4. 2. 3. 2 本実験

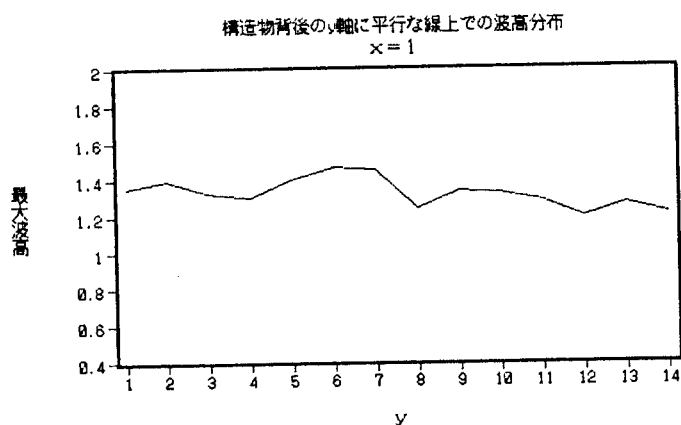
4. 2. 3. 2. 1 構造物直後の波高分布

3. 6. 3で述べたように、回折計算でだした構造物直後の波高分布とホログラム波高が等価であるかを検討したように、実測した構造物直後の波高分布とホログラム波高とを比較することができる。

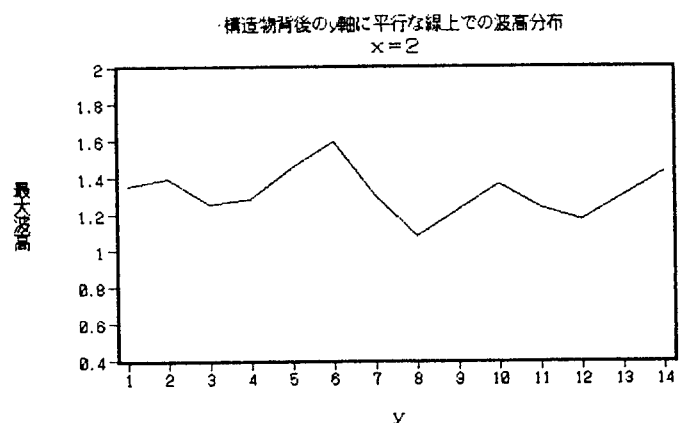
最大波高で考える。図-4. 4に y 軸に平行な線上での最大波高値の分布を示す。横軸は y 座標の数字、縦軸に最大波高を示している。

構造物直後というならば $x = 1$ の最大波高分布であるが、中央 ($y = 7, 8$) で少し波高が小さくなっていることぐらいがホログラム波高と似ているぐらいで左右の振動部分についてははっきりとは言えない。

全体としては y 軸方向への測定間隔が5 cmと粗いため細かい最大波高分布を測定できていないといえる。

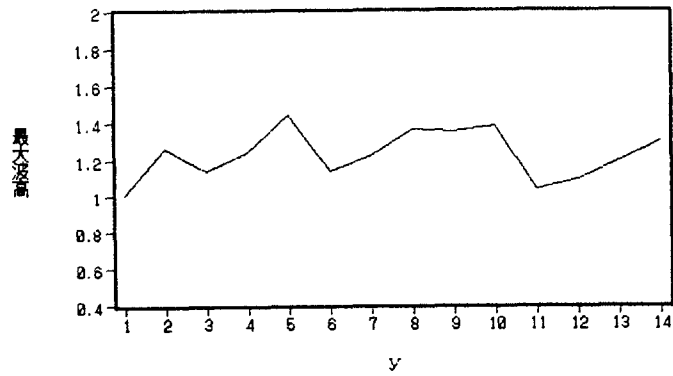


(a) $x = 1$



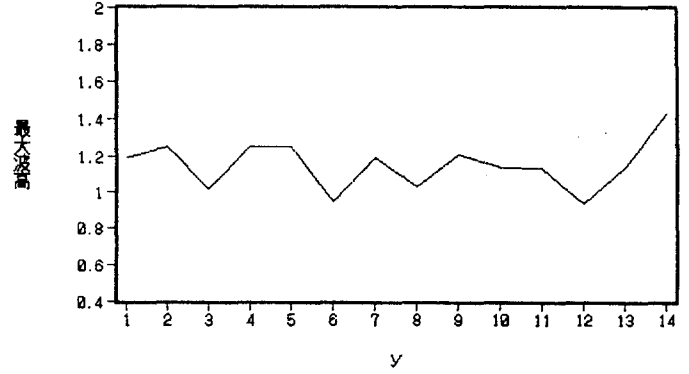
(b) $x = 2$

構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
x=3



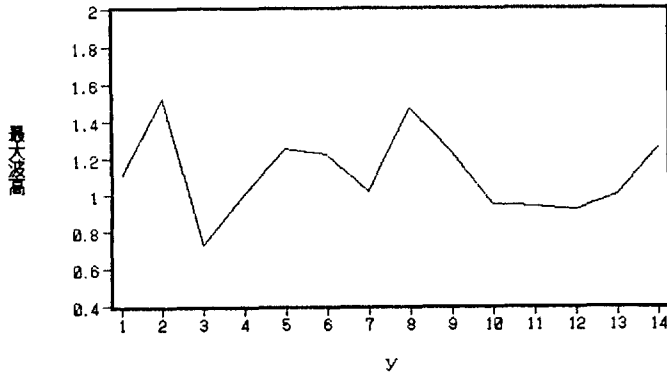
(a) x = 3

構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
x=4



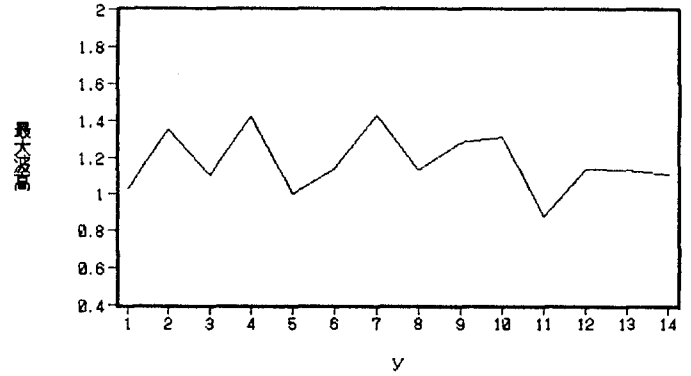
(b) x = 4

構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
x=5



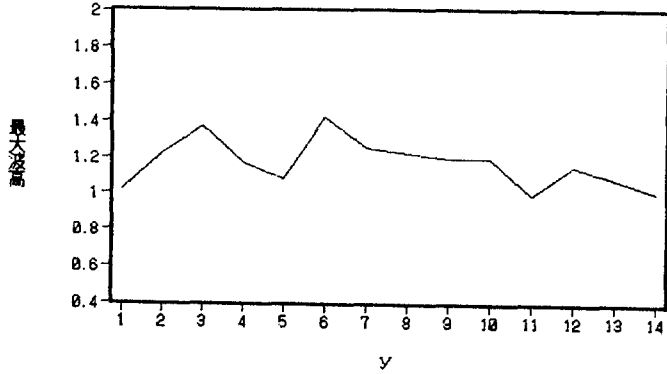
(a) x = 5

構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
x=6



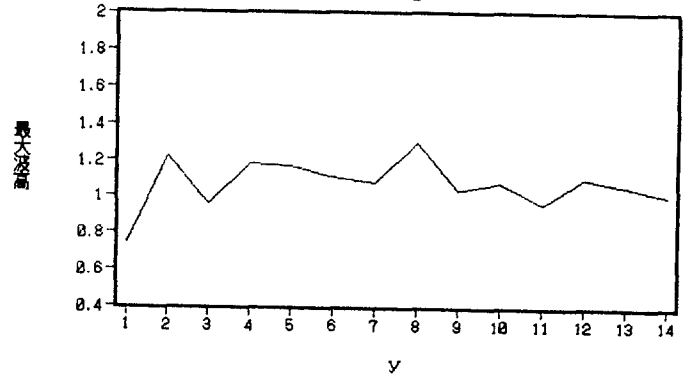
(b) x = 6

構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
x=7

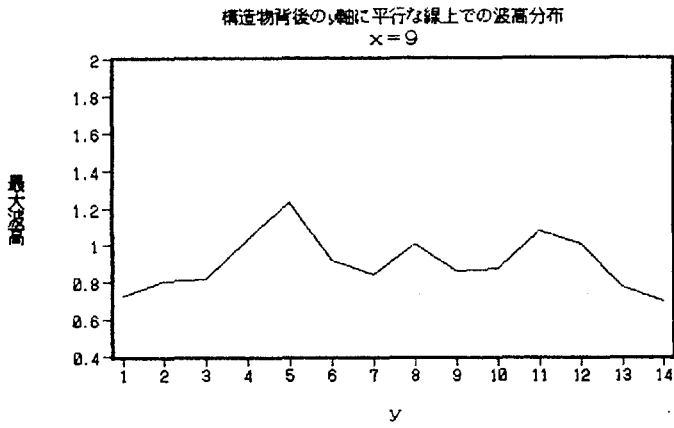


(a) x = 7

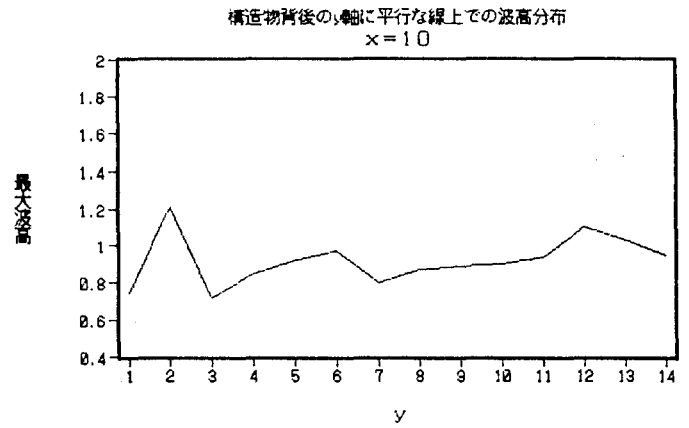
構造物背後のy軸に平行な線上での波高分布
x=8



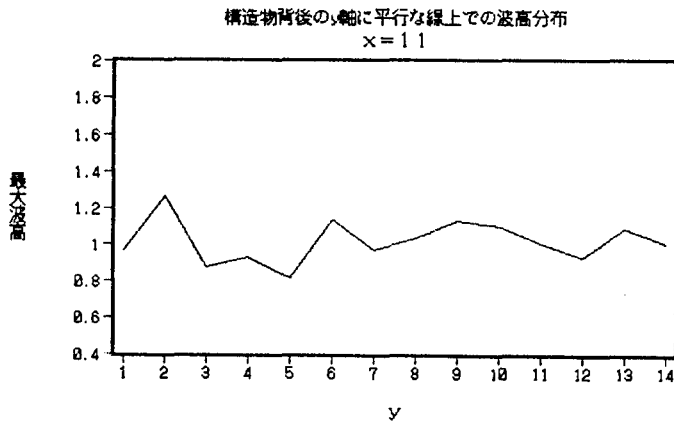
(b) x = 8



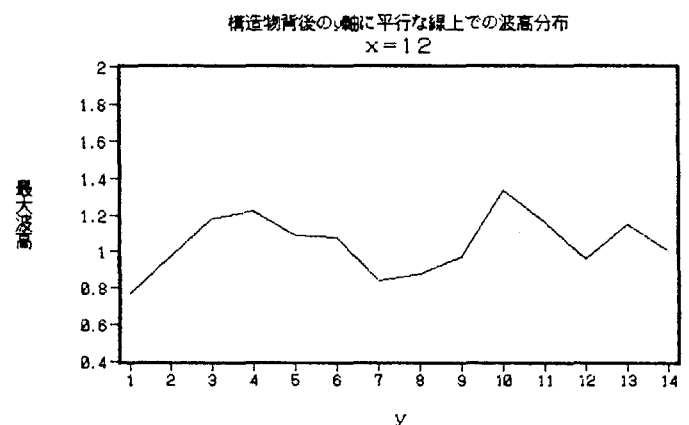
(a) x = 9



(b) x = 10



(a) x = 11



(b) x = 12

図-4.4 構造物背後の最大波高分布 (y軸に平行な線上)

4.2.3.2.2 波浪制御状況

円形島1つの場合について考える。

図-4.5と図-4.6は同じ円柱配列に対する再生結果である。図-4.2に示した各格子点上で波高を測定し、最大波高の値の等波高分布曲線を描いたものである。図-4.5は測定方法Aで、図-4.6は測定方法Bによる結果である。さらにモーターは図-4.5ではギアヘッドなし、図-4.6はギアヘッド付きという違いがある。

図-4.5、4.6には島堤(直径100m)の領域を破線で示してある。

図-4.5からは、破線で示された島堤の外周に沿って波高が0.4から0.8の範囲で周囲に比べて低い帯状の領域が確認される。したがってこの帯状の領域を波浪制御可能と考えられる。

図-4.6についても図-4.5と同じように、島堤の外周に沿って波高が0.8から1.0の範囲で周囲に比べて低い帯状の領域が認められる。この場合も帯状の領域を波浪制御可能と考えられる。

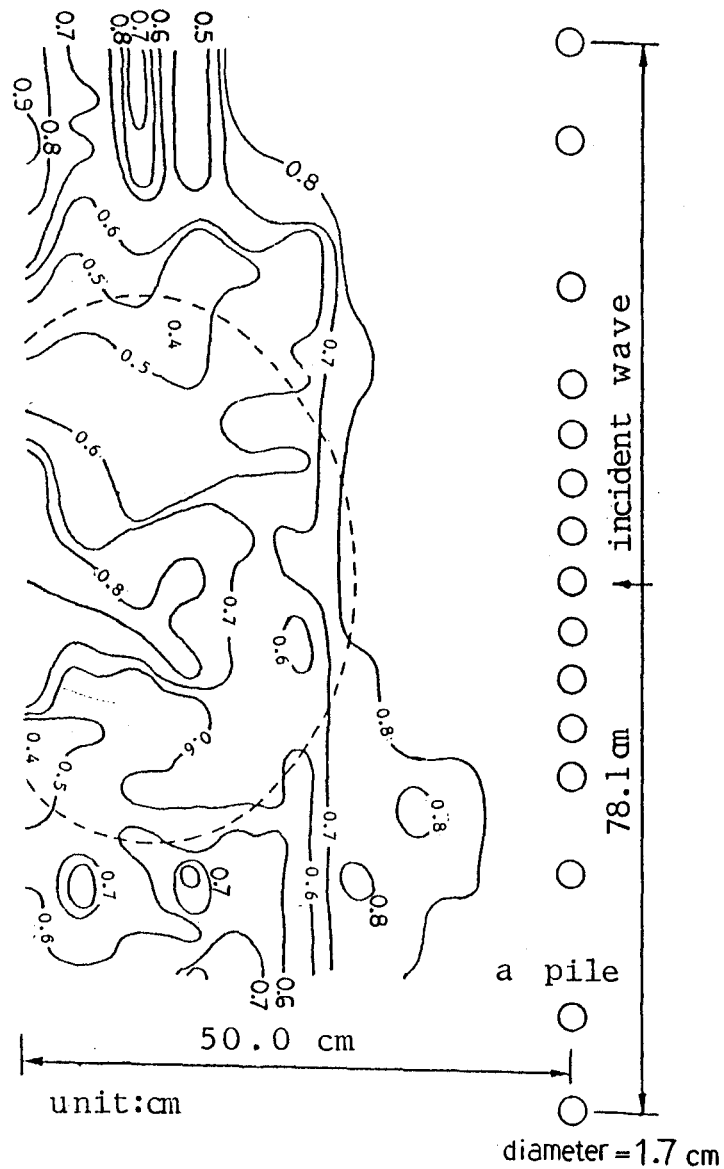


図-4.6 等最大波高値分布曲線

(A測定方法による。モーター用ギアヘッド無し。)

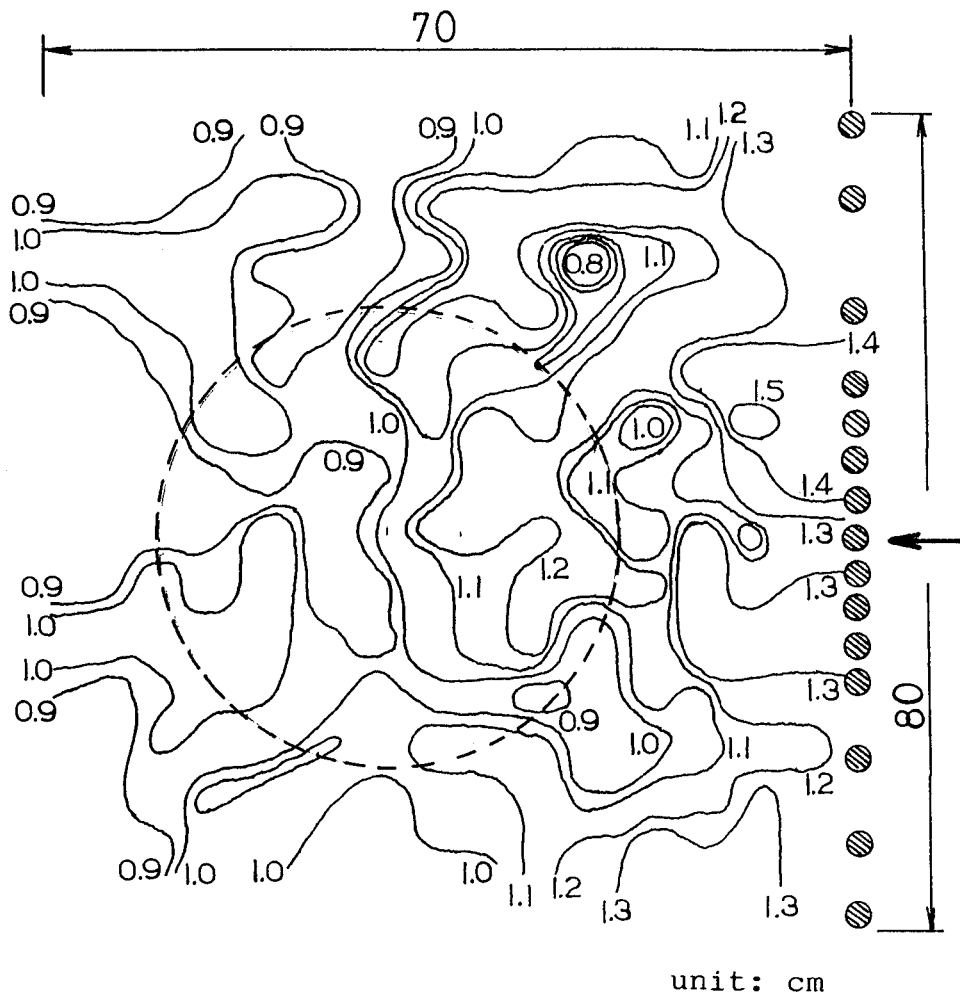


図-4.6 等最大波高値分布曲線

(B測定方法による。モーター用ギアヘッド付き。)

4. 2. 4 考察

実験で発生させる水面波について、第3章で展開した水面波ホログラフィ理論の中で仮定されている諸条件を満たしているかどうかについて考察する。

4. 2. 4. 1 時間的、空間的にコヒーレントかどうか

入射波については予備実験で、固定測点での連続210波の測定データからほぼ周期、波高共に定常であることを確認しているため、時間的にはほぼコヒーレントであると考えられる。空間的には水槽の $x = 0 \sim 12$ の範囲では周期、波高共にほぼ定常であることを確認しているため、ほぼ空間的にもコヒーレントであると考えられる。

散乱波のみについての定常性の実測確認はできていない。散乱波については定常性を仮定して考えることにする。

入射波、参照波、再生波についてはほぼコヒーレントであると考えられる。

4. 2. 4. 2 インラインホログラフィの物体が半透明であること

島堤は参照波を透過させない構造である。しかしホログラム波高を計算する段階で述べたが、入射波と散乱波のポテンシャルを島堤以外の全領域で足し合わせていることが島堤内を透過して入射波が通過する考え方になっている。

したがってホログラム波高はインラインホログラフィで必要とされた物体の半透明さを満足するように計算されている。

4. 2. 4. 3 振幅透過率

3. 7. 6で述べたと同じことが言える。したがって円柱間隔が小さくなれば流体が円柱間を通過するときに生じる渦によって失われるエネルギーを考慮する必要がある。本実験では、エネルギー損失が結果として円柱群背後の波高に表されるようになるので、エネルギー損失の影響も波高の実測結果にはでていることになる。

4. 2. 4. 4 波浪制御状況（再生状況）

図-4. 5、4. 6からわかるように波浪制御は島堤（物体）の外縁で波高が小さくなる傾向がある。物体の内部の情報が無い場合は、再生するときには物体の外側だけ再生す

るようになるのではないかと考えられる。

4.3 結言

本実験装置（図-4.1）を使った発生波の周期はほぼ定常である。

波高の進行方向（ x 軸負から正の方向）への変化は、平均波高については水槽座標 $x = 0$ から 12 ぐらいまではほぼ一定である。ただし $x = 13$ 、14 付近では岸（波消し装置を設置している）からの反射波の影響がでて急激に波高が約 30% 低下する。したがって、発生波の安定している範囲（ $x = 0$ から 12）を検討可能範囲とした。

1. 各測点で毎回静水面の状態に復帰させてから波を発生させ、連続 20 波間を測定する方法では、島堤のほぼ外周に沿って波高が約 10~50% 低下することがわかった。他に波高の低いところもある。

2. 波発生開始からある時間経過させる。波を発生させ続けている間に波高計を次の測点へ移動させ、1 測点あたり連続 210 波を観測する方法では、島堤のほぼ外周に沿って波高が約 10~30% 低下することがわかった。他に波高の低いところもある。

3. 観測結果を示すことはできなかったが、実験中波起こし板と円柱群列の間に波高が高くなる領域が確認された。これは虚像に相当する領域内では波高が実像領域とは逆に波高が高くなることを示している。

4. 実測した構造物直後の最大波高分布とホログラム波高とを比較したが、 y 軸方向への測定間隔が粗くはつきりしたことは言えなかった。

5. 1. の方法、2. の方法でも再生領域である円形の周囲に沿って波高の小さい領域が円環状に観測された。これは円形島内全域の波高が小さくなるのではなく、周囲の波高が帯状に小さく再生されるということである。したがって、本手法による波浪制御は円形の帯状の領域内が約 10~30% 程度可能である。

参考文献

1. 檀和秀、筧源亮：ホログラフィ理論を基礎とした海岸波浪制御について、可視化情報、Vol. 11、Suppl.、1991.
2. K.Dan and M.Yano: Study of Holography Applied to the Piles Structure for Wave Damping in Sea Shore, Proceedings of the Sixth International Symposium on Flow Visualization, pp.363-367, 1992.
3. 檀和秀、筧源亮：ホログラフィ理論を基礎とした円柱群配列による海岸波浪制御、海岸工学論文集に投稿中、1993.

第5章 画像処理による波高分布計測

5.1 緒言

模型実験を実施して波浪制御状況を確認するとき、多数点で波高計を用いて波高分布を計測する方法が多く採用されている。中規模、大規模の実験の場合は以上の方法をとらざるを得ないが、比較的小規模の実験の場合には水路底をガラス面にして上面からの自然光が透過する光の強度分布（明暗）を写真に記録し回折状況を調べることがある。¹⁾この方法は瞬間的な波峰線を見ることができ、長い時間にわたっての観測にはビデオカメラを使用することができる。

水面に入射する光が波面で屈折すると、ガラス底面で観測される光の強度分布は波の山で明るく、波の谷で暗くなる。まえもって観測される光の強度分布と波高とを検定しておけば、ビデオで明暗分布を記録し波高分布を測定することが可能である。長時間にわたっての波高分布を調べるにはビデオ画像全フレームの画像データの強度分布を調べる必要がある。

実際の海洋での波高計測への応用は、水中カメラ、あるいは水中ビデオカメラを水面に向けて水中に固定して波面を通過してくる光強度を測定したいのだが、水中カメラを用意できなかったので図-5.1のように水中のガラス面での通過光の強度をビデオカメラで記録した。あらかじめ調べておいた波高と観測光強度の検定結果と照合すれば波高観測が可能となり、実用的にも有効である。²⁾

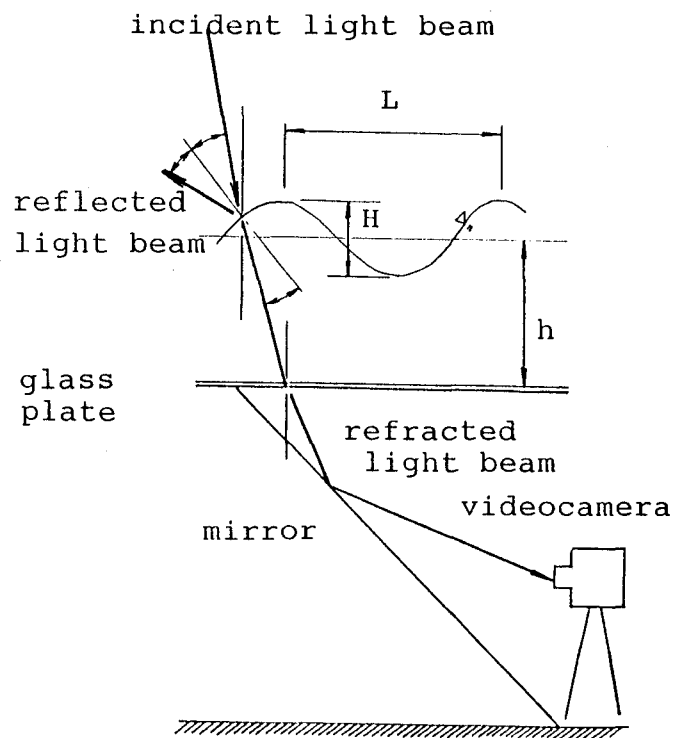


図-5.1 可視化波高計測例

パソコンを用いて波面での屈折シミュレーションを実施し、水深 h で観測される光の強度分布を計算した。シミュレーションは波高 H 、波長 L 、水深 h を変化させ、ガラス面で計算される光強度に関する諸量すなわち最大強度と最小強度の差、平均強度より大きい強度分布の幅を選び、相互の関係を調べた。

以上の結果をもとに波形勾配 H/L を最大最小強度の差と平均強度以上幅という量で重回帰分析した。

また水槽での規則波実験を実施して画像から得られる波長を使って波高を推定した。

円柱を2本設置した場合の回折波領域を可視化計測し4.2で述べた解析解と比較した。さらに第3章で決定した円柱群配列に対して可視化計測の模型実験を実施した。

5.2 波面での光の屈折

正弦波の波を考える。波高 H と波長 L 、水深 h を仮定する。空気中から水中に光が入射する場合、波面での反射は入射角と反射角が等しくなるように反射する。今の場合、反射波は波面のどの位置でも一律に反射するものとし考慮しないものとする。波面での屈折率 n はスネルの法則から

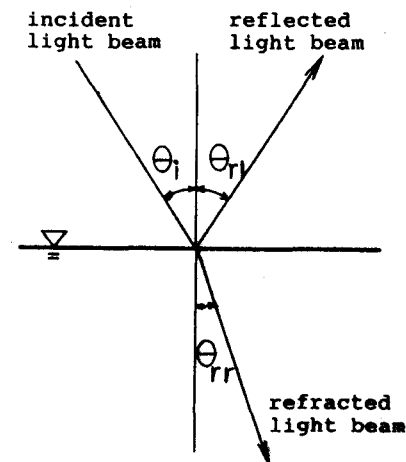


図-5.2 反射と屈折

$$n = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_{rr}} \quad (5-1)$$

n は空気中から水中に入射する場合約1.33である。³⁾ただしここでは一旦反射した波や屈折した波の2次的な反射、屈折は考えない。このような簡単な仮定を設けた上でこの n の値を一定にして、種々の入射角に対して屈折波はどのような方向に進むかを、パソコンを用いて波面での屈折シミュレーションを実施し、水深 h で観測される光の強度分布を計算してみた。入射光は同一方向からの平行光線のみを考えており、散乱光のように多

方向からの入射は考えていない。光線はある一定の密度をもつ線の集まりと考える。波面上方からこのような光線を入射角を種々に変化させて入射させた。入射光の入射方向は図-5.2のように 30° から 10° 間隔で 90° までの7種類に変化させた。波形勾配を0.01から0.1までの5種類に変化させた。水深は模型の大きさを考えて2cmから10cmまで2cm間隔で5種類に変化させた。

観測点に光線が1つ到達することに1度数増やすという考えで度数分布図を描いたのが図-5.3である。波面での屈折によって透過光強度は波の山の下で明るく、波の谷の下で暗くなるのがわかる。

以下のことがわかった。²⁾

1) 波形勾配が大きいと水底で観測される光の濃淡の差は大きくするが、波形勾配が小さいと濃淡の差は小さくなる。このことから本手法は波形勾配の非常に小さい波に対しては波高推定精度が悪くなると考えられる。

2) 入射角を真上(90°)から水平方向に傾けるにつれて水底で観測される光の濃淡の位置は真下から横に

移動する。従って入射方向によって波高推定位置を補正する必要がある。

3) 水深が変化すると水底で観測される光の濃淡の差も変化する。波の山が凸レンズに、波の谷が凹レンズに相当し、レンズの焦点距離と同様に水深が焦点距離に近づけば波の山と谷での光の濃淡の差も大きくなるが、離れば濃淡の差は小さくなる。

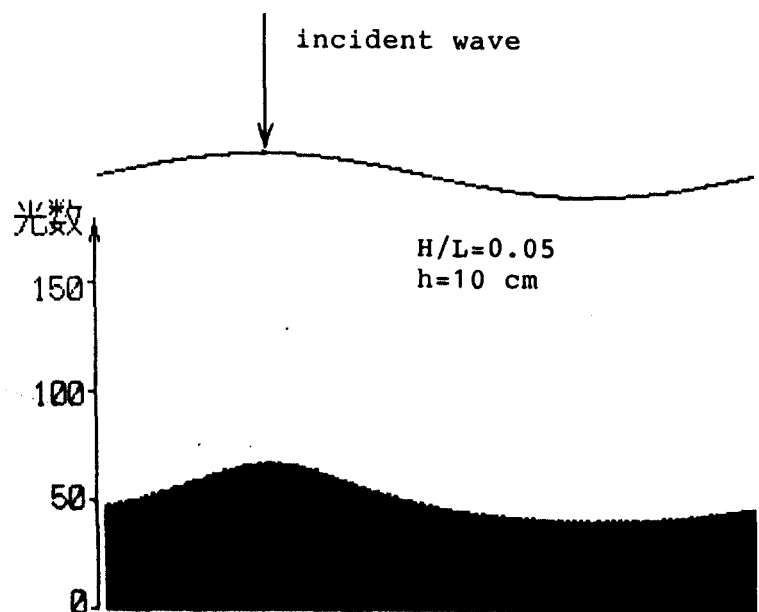


図-5.3 シミュレーション結果

5.3 規則波の場合の波高の推定

図-5.3のシミュレーション結果を模式的に示したのが図-5.4である。波高を推定するのに実験から得られる濃淡画像より、図-5.4のように濃淡の指標として次のよ

うな2つを選び波形勾配を重回帰分析した。

$$\frac{H}{L} = a_1 + a_2 N + a_3 D \quad (5.2)$$

ここで、 N ：平均輝度より明るい点の数、 D ：最大輝度と最小輝度の差である。 a_n ($n = 1 \sim 3$) は回帰係数である。

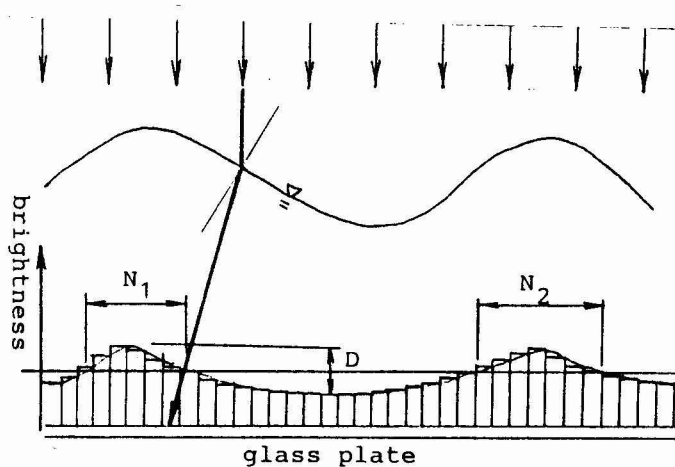


図-5.4 シミュレーションの模式図

あらかじめ観測用ガラス面には2.5cm間隔に格子状にマジックで線を記入してある。規則波の濃淡画像の1例を図-5.4に示す。波長 L は図-5.5のように濃淡画像の明るいところから次の明るいところまでの距離として画像より実測できるから、(5-2)式より波形勾配が得られれば波高が推定できる。この画像の濃淡から波長を推定した結果12.5cm、波高の推定結果は1.6cmとなった。入射角が真上(90°)で水深が6cmの場合の回帰係数は $a_1 = 0.068$ 、 $a_2 = -0.0004$ 、 $a_3 = 0.0005$ となった。

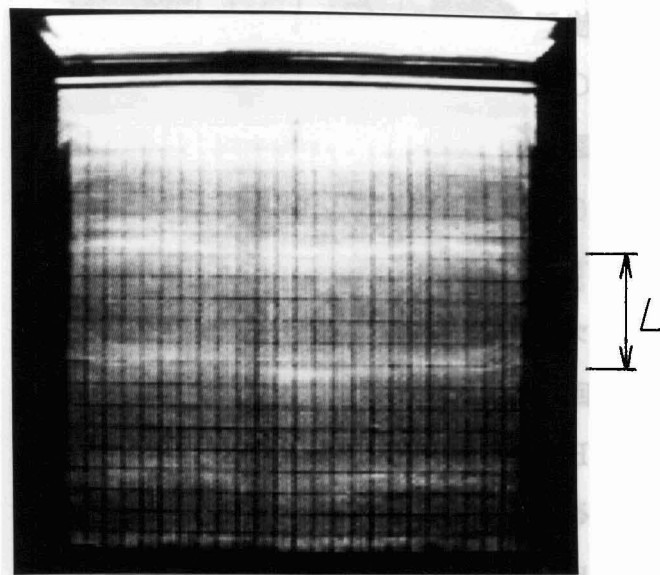


図-5.5 規則波の画像から得られる波長

5.4 画像処理

波高と明暗の関係が確実に検定されれば波高計測は確かなものになる。水面での反射にしても反射係数は入射角の関数となる。波面での偏光も考慮せねばならない。また水中での光の吸収特性についても議論せねばならない。現段階では波の山ではレンズ

の作用と同様に光を集光し明るくなること、波の谷では逆にひろがり暗くなることとする。したがってある1点で観測するとき、波面を通過して到達する光の強度は観測点の上に波の山が来たときは明るくなり、波の谷が来たときは暗くなるといえる。このように考えるとビデオカメラで観測された画像1枚に記録された濃淡はその瞬間での波高分布の情報を表していると言える。

5.3で述べた方法は規則波を仮定しており、不規則波への応用はこのままではできない。ただし、回折波領域や波浪制御領域などを可視化するには濃淡差を表示すればよいので以下に示す通り実施した。

5.4.1 回折領域の可視化測定²⁾

使用した画像デジタイジングボード (CVI98II:カノープス電子製) は図-5.6のように1フレームを256×200画素に分割して、各分割点でのR、G、B各成分をそれぞれ6ビットデータとしてメモリに格納する。今回は濃淡画像に変換するのにR、G、B各成分を同じ比率で足し合わせている。1周期程度以上にわたって波面をビデオカメラで観測し、ある画素での観測時間内の全フレームにわたっての濃淡を調べ、レベル表示すれば波高の高いところと低いところを区別することができる。波の山と谷が無いようなフラットな水面の場合には濃淡の差は無いし、波の山と谷の差(波高)が大きい場合には濃淡の差が大きくなるということはわかる。

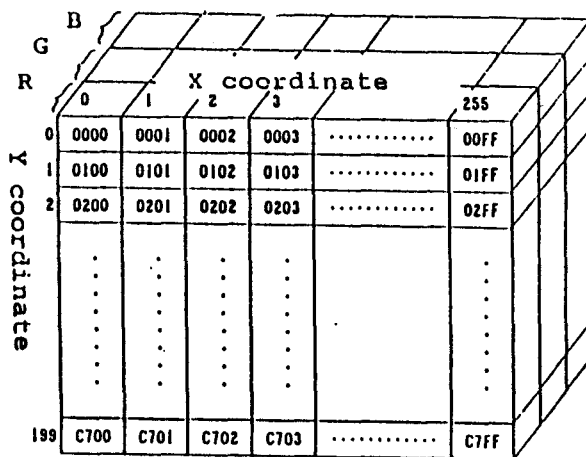


図-5.6 画素配列

ここでは画像フレームの各画素における観測全フレーム間での濃淡の差、最高の輝度、最低の輝度に注目して平面的なそれぞれの分布を調べた。

実験は鉛直円柱2本(円柱径6cm)を置いた場合の波動場である。水槽の大きさは幅68cm、長さ70cm、高さ5cmである。現在使用中の家庭用ビデオデッキにはフレ

ーム単位のアドレスサーチ機能がないため、一旦画像編集機 (Panasonic AG-6500) を用いて生画像の必要な部分を編集し、最初のフレームの頭出しを正確にし、以降ビデオデッキのこま送り機能を使用して連続30フレーム分の画像データをCVI98IIで読みとる。静止生画像 (30フレーム分) の内1フレームをCVI98IIでパソコンのディスプレイに表示したものの写真を図-5.

7に示す。回折領域の波高の大小を表示するにはこの画像データは少なくとも1周期程度以上を必要とする。実験周期は0.3秒である。ビデオデッキは毎秒30フレームの速度で記録するからこの場合10フレーム分で約1周期程度分となるが、30フレーム (約3周期) をフロッピーディスクに保存した。データ量が多くなるため一旦全データをワークステーションに転送し、計算結果を再びパソコンで読みとりディスプレイに濃淡16段階で表示することにした。

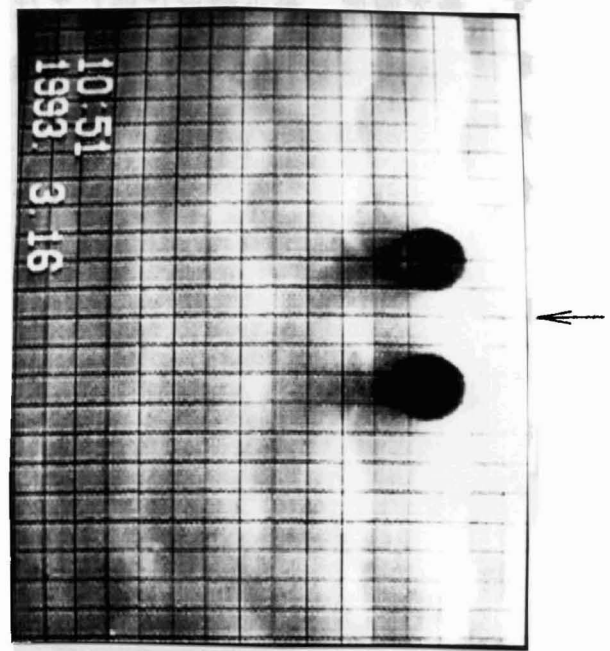


図-5.7 回折状況

5.4.2 画像処理結果

30フレーム分の画像データを処理するのであるから、各画素について (R、G、B、M) の30組のデータができる。ここでMとはR、G、B各成分を同じ比率で足し合わせた濃淡要素であり、CVI98IIで読みとったR、G、B各成分そのままの値を足し合せている。解析解としては4.2で求めた解を使う。円柱2本の場合の速度ポテンシャルをBessel関数の級数解として求め、得られたポテンシャルから波高分布を計算した。波高

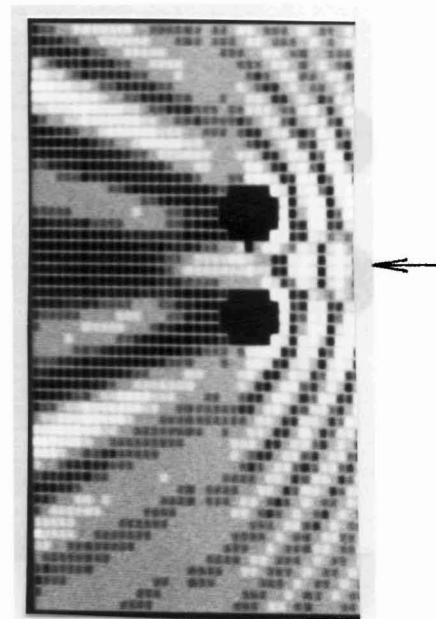
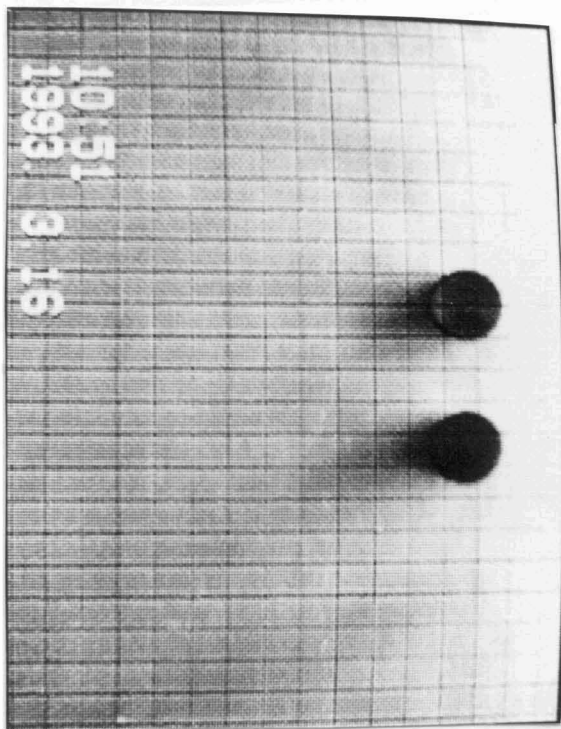


図-5.8 解析解⁴⁾

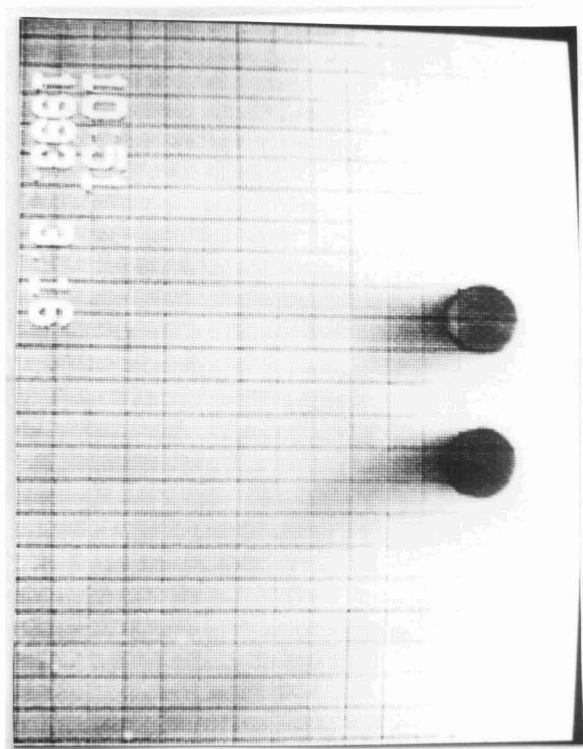
の大きい方は濃淡の明るい方に、波高の小さい方は濃淡の暗い方に割りあて、濃淡16段階表示したものが図-5.8である。⁴⁾

ここで各画素において観測全フレーム(30フレーム)の中での最大輝度、最小輝度、これらの差の3つについて注目し、それぞれ大きい方を明に、小さい方を暗になるように濃淡16段階表示をした。これらを図-5.8、5.9、5.10にR、G、B、M別に示す。最大輝度、最小輝度に関しては図-5.8、5.9を見ればわかるように解析解と比較してR、G、B、M共に回折領域ははっきりとは認められなかった。(最大輝度-最小輝度)の濃淡16段階表示を見るとR、G、B成分については解析解のような波高の低い領域ははっきりとは認められないが、薄い濃淡でその傾向は認められる。Mについては図-5.10の通り波高の低い領域が解析解とよく合致している。

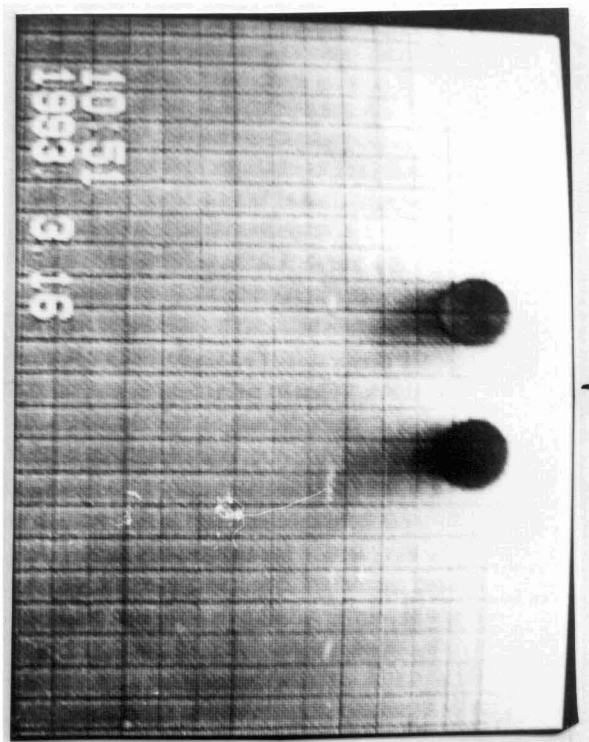
図-5.9、5.10、5.11に共通しているが、円柱近傍に黒く短い陰が表出している。これは実験装置が窓から約20cm離れて設置しており、撮影時刻の太陽の高さと水槽の窓からの距離の関係による。



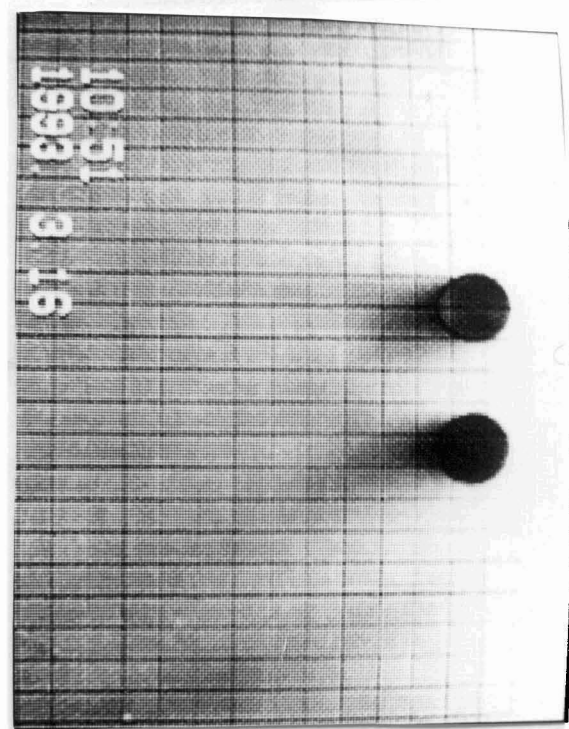
(a) R-image



(b) G-image

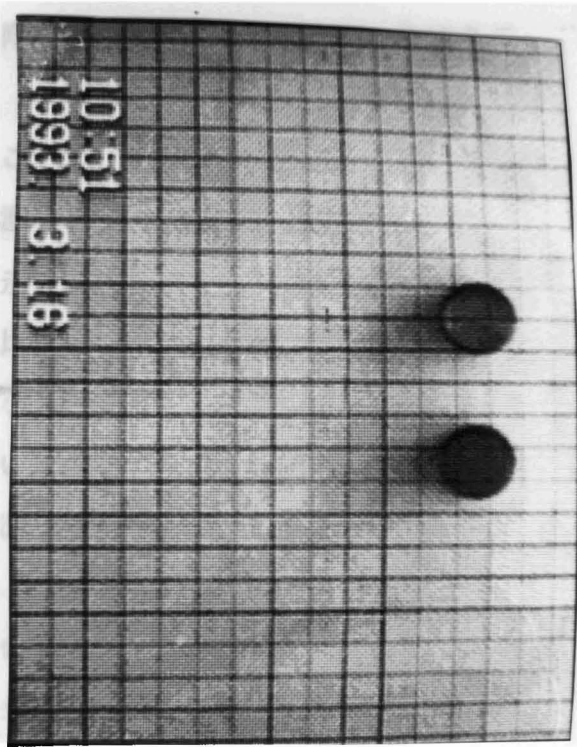


(c) B-image

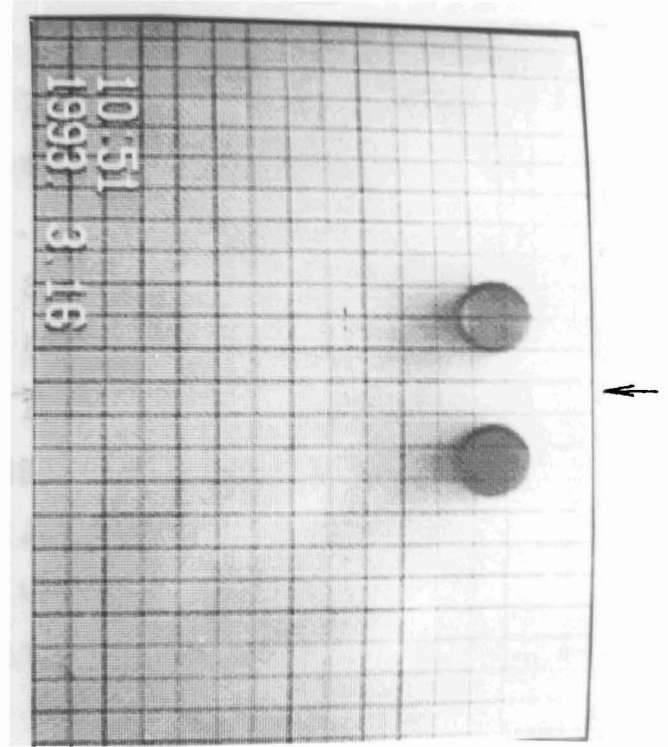


(d) M-image

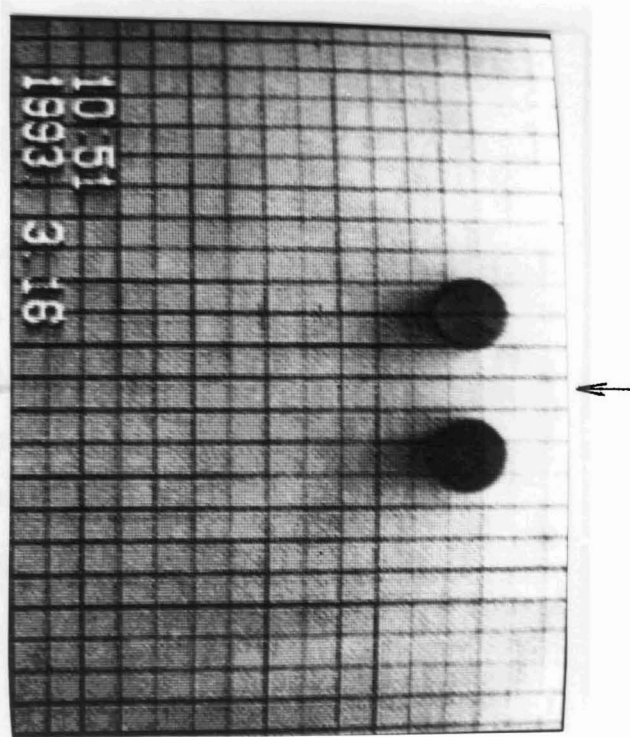
図-5.9 各画素における最大輝度に関する濃淡16段階表示



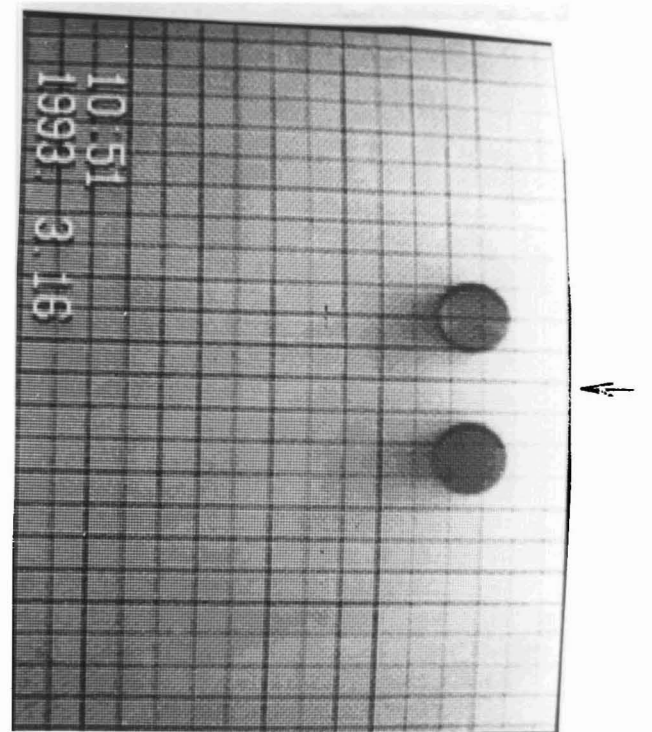
(a) R-image



(b) G-image

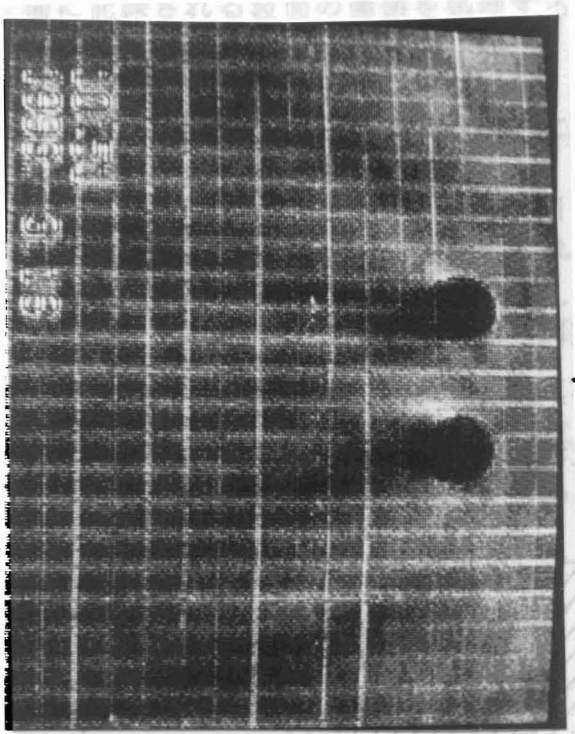


(c) B-image

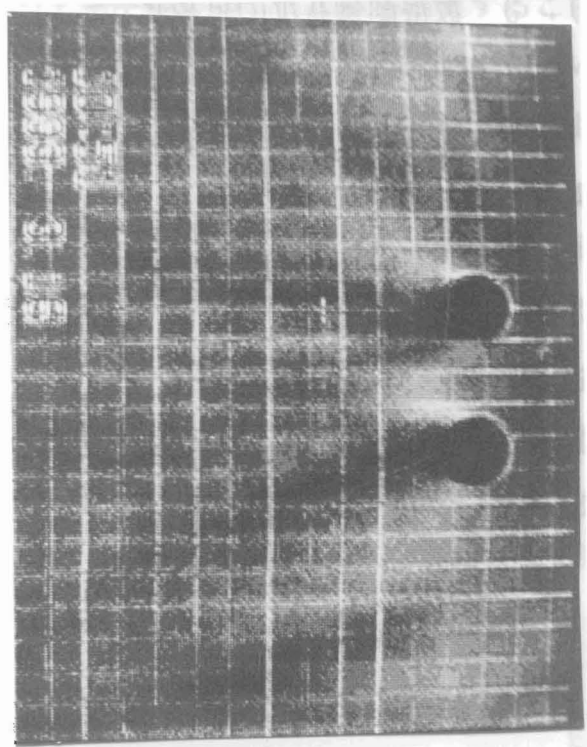


(d) M-image

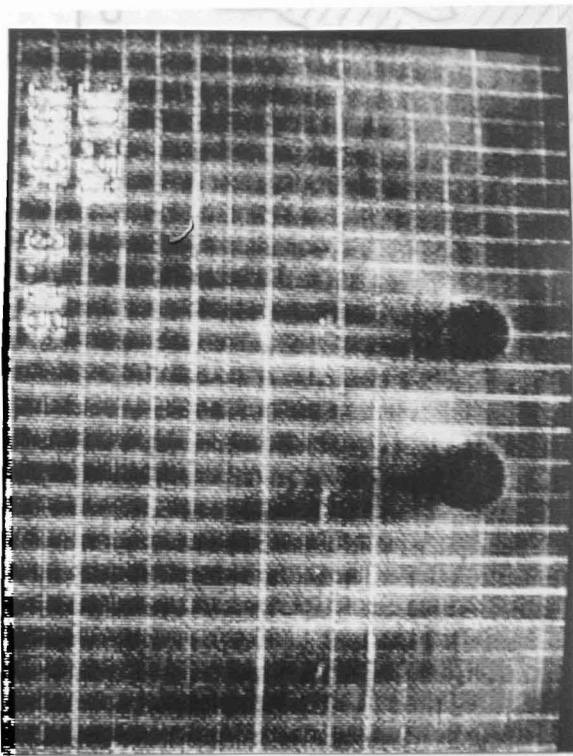
図-5.10 各画素における最小輝度に関する濃淡16段階表示



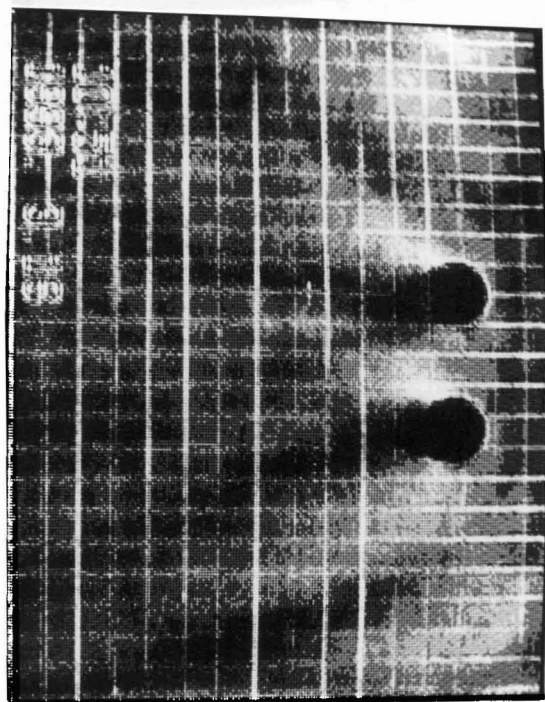
(a) R-image



(b) G-image



(c) B-image



(d) M-image

図-5.11 各画素における(最大輝度-最小輝度)に関する濃淡16段階表示

5.5 波浪制御状況の可視化⁵⁾

ホログラフィ理論を基礎にした円柱群配列例として図-3.3の配列に対して水槽模型実験を実施し、波浪制御状況を可視化計測した。円柱は直径1cmの木製円柱を使用する。円柱は縮尺1/500で配列させた。

全観測フレームは連続20フレームとした。実験周期は約0.15秒程度である。M-imageの写真を図-5.12に示す。この写真から比較的暗い領域、波高の低い領域を図化したのが図-5.13である。円環状の波浪制御領域を確認することができる。ただしそれ以外の領域でも暗い領域はある。

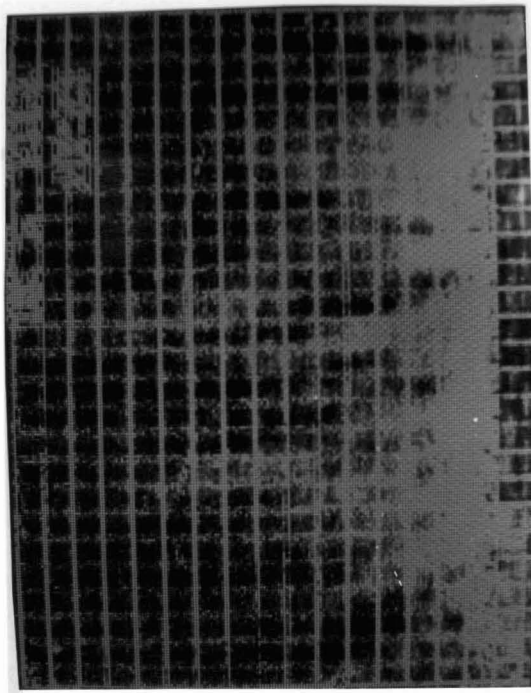


図-5.12 波浪制御状況の可視化

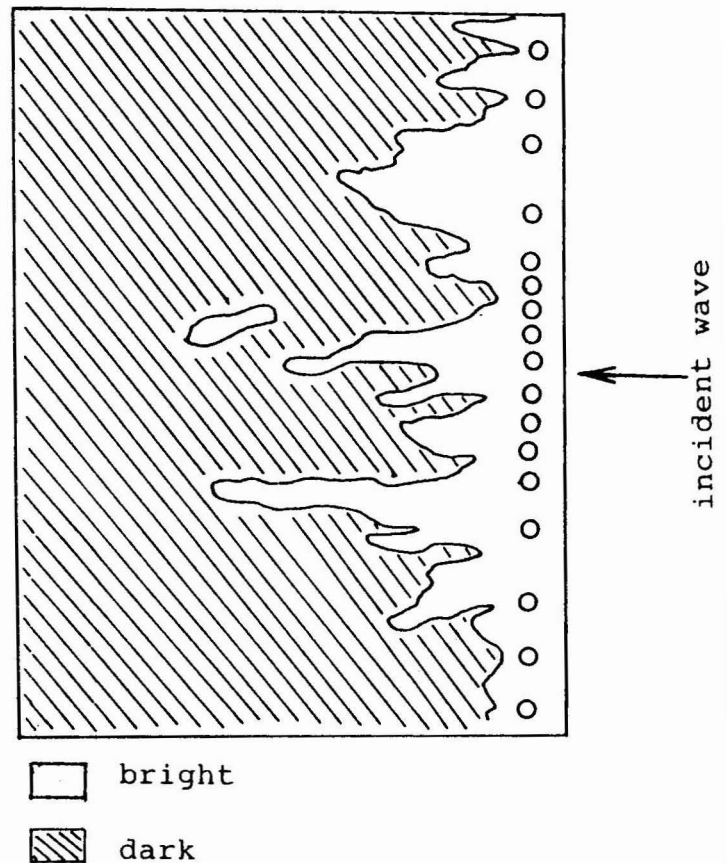


図-5.13 左図の図化

5-6 結言

水面での反射、偏光、水中での吸収など考慮すべき点もあるが、水中に設置したガラス

面に記録される波面の画像を処理することによって規則波に対して波高を推定することが可能であることを示すことができた。不規則波に対してはこのままでは応用はできないが、波高計で波高を観測しながら、同時に波の山と谷の輝度を測り輝度差との関係（校正曲線）を作成しておけば波高を推定できる。

水中に置かれたガラス面に投影される画像を1周期程度の全フレームにわたって観測し、その濃淡画像データを処理することによって回折領域や波浪制御領域を可視化計測することができる。

ホログラフィ理論を基礎にした円柱群配列に対してこの可視化計測手法を応用したが波浪制御領域を明確には測定できなかった。これは波長（約10cm）に比べて円柱径（1cm）が小さすぎたためであろう。しかし図-5.13の中に円環状の波高の比較的小さい領域をはっきりとは確認できた。

参考文献

1. 霜田光一、伊藤信隆、中込八郎：波動の実験〈波のふるまいにおける類似性〉、講談社、pp.84-115、1973.
2. 檀和秀、篤源亮：水中から観測した波面の画像処理による波高計測、第21回可視化情報シンポジウム、pp.233-236、1993.
3. 富山小太郎訳：フラインマン物理学Ⅱ、pp.3-4、岩波書店、1974.
4. 檀和秀：円柱群による海洋回折波の特性と海岸波浪制御、明石高専研究紀要第33号、pp.51~68、1991.
5. 檀和秀、篤源亮：ホログラフィ理論を基礎とした円柱群配列による海岸波浪制御、海岸工学講演会論文集、投稿中、1993.

第6章 結論

透過型の消波構造物は海水交換が可能であり、その消波効果が十分であればすぐれた消波構造物である。従来の鋼管杭を用いた透過型消波構造物は鋼管の配列が等間隔であって、その列数を多くしたものや、千鳥配列にしたといったものであった。本研究はホログラフィ理論を応用して透過型の消波構造物の構造を逆解析的に決定した。その消波構造物の構造として円柱杭群を選び配列を決定しようとした。光ホログラフィで言うホログラムに相当する構造物が円柱杭群になるので、円柱杭の間隔を変化させることがホログラムの干渉縞の役割をしている。また決定された透過型の円柱群構造物に來襲波浪を想定した入射波をあてて波浪制御状況を理論と実験からも確認した。以下、各章で得られた結果をまとめて結論とする。

第1章では消波構造物をエネルギー減勢によるものと、位相干渉効果を利用するものに分けて、前者の例として鋼管杭利用の透過型消波構造物をあげ、後者の例として海底地形との位相干渉、複数列潜堤などをあげた。海底地形としての多数のripple、潜堤を複数列にすることは位相ホログラムとしての単列の円柱杭群を複数列にする場合に相当する。さらにどのようにしてホログラフィ理論を海岸波浪制御に応用するに至ったかについての背景を述べ、ホログラフィ理論を基礎とした円柱群配列による海岸波浪制御手法がどのような場合に適するかについて従来の消波構造物と比較した。

第2章では反射率と透過率、エネルギー損失率の3つ全部をあわせて考えることで消波構造物の消波性能を判定することができることから、これらの指標の決定方法について述べた。さらに消波発電装置の1種について反射率をフーリエ解析による分離推定法で求め、実験装置の特性や実測波形の離散化数について考察した。特に本論に関係する鋼管防波堤について、Costelloから林等の理論展開、角野等の境界値問題解析までを紹介した。これらの透過型鋼管防波堤はいずれも鉛直2次元的な実験条件として考察されており、鋼管も一様な配列であることから平面的には構造物の背後は一様な消波効果を想定している。本研究では鋼管の間隔をホログラフィ理論に基づいて変化させていることや、ある領域内を想定し、その領域を波浪制御できるような逆解析可能な手法であること、逆解析手法としてはホログラフィ理論を応用していることが従来の研究とは違っていることを示した。

第3章では光のインラインホログラフィ理論を示し、ホログラフィ理論は回折波現象が

基礎になっていることを確認し、水面波ホログラフィと比較した。まず光の回折積分式を誘導するうえでの各種仮定を挙げた。光の回折理論が海の波に適用できると仮定して、数値計算ホログラフィを1次元物体に対して応用し、像再生が良好である条件として物体幅 w と波長 λ の比 w/λ が 10^2 以上、かつ物体面と観測面との距離 d と波長 λ の比 w/λ が1以下であること、しかも両者で囲まれる三角形状の範囲内であることが必要であることを示した。

しかし水面波は波長が大きい、不規則波であるなど光波とは取扱いが違うので、水面波の回折理論では各種近似条件を設けない厳密な理論展開が必要である。本論では水面波を規則波と仮定して、3.4で実際の海の波に対して直線状に配列された円柱群に対する波の回折現象を円柱本数が多数である場合でも解析できるプログラムを作成し、回折解析を実施した。

ホログラフィを海の波に応用する場合には、ホログラフィというホログラム作成、再生という2過程を3段階に分類した。1段階はホログラム作成に相当するホログラム波高を決定することである。第2段階はホログラム波高に等価な透過型円柱列群に変換することである。第3段階は再生に相当し、第2段階で得られた円柱列群に対し来襲波浪に相当する入射波をあて構造物背後の再生状況を円柱杭が多数本の場合の回折解析を応用して波高分布を求めた。光ホログラフィという再生状況とは海の波の場合には円柱列群背後の波高分布を計算することであり、波高が低く抑えられておれば波浪制御されていると考えてよい。第2段階のホログラム波高に等価な円柱群に変換する際、ホログラム波高の高い部分に円柱を粗に配列し、ホログラム波高が低い部分には円柱を密に配列させる方法が適当であることを示した。ホログラム波高の使用する幅は短すぎてもいけず、ホログラム波高の中央の低い部分の約3倍程度の幅が望ましいこと、円柱径を変化させることで回折波領域の波高分布を変化させられることなども示した。以上のようにホログラフィ理論を基礎にした円柱群配列による海岸波浪制御の内、変換すべき円柱群配列の決定手法を確立した。

第3段階の再生については、上記手法で決定された円柱列群の波浪制御状況は想定した円形島の外周に沿った円環状領域に対して波高を約10~30%低減させることがわかった。また再生領域が2円形島の場合に対しても計算し、それぞれの円形島周辺に波高の小さい範囲が確認された。しかし円柱群構造物の入射波側には波高の高くなる領域が確認されたことについては注意が必要になる。

第4章では模型実験を実施して第3章で決定した透過型の円柱列群に対して波浪制御状

況を確認した。ここでも第3章で判明したと同じ現象が現れた。つまり波浪制御領域として想定した円形島の外周に沿った円環状領域内で波高が約10～30%程度低減されることがわかった。

第5章では可視化手法を応用した新しい波浪制御領域の確認手法を示した。円柱2本の場合の回折領域を可視化計測し理論解と比較した結果よく合致することが示された。この手法で第3章で決定された円柱列群に対する模型実験を実施した。波長に対する円柱径の比が約1/10と小さいこともあり、はつきりとはではないが第4章と同じように仮想波浪制御領域としての円形島に対する円環状の範囲内は波高が小さいということを確認した。

以上総合的に述べると、ホログラフィ理論を基礎とした円柱群配列による海岸波浪制御は、円形島の外周に沿った領域の波高を約10～30%低減させ得ると言える。これは光ホログラフィの再生のところで述べたようにホログラムに再生光を当てた場合、ホログラムから出て物体を再生する光は0次透過光など4つの光のうちの1つである。平均的には物体を再生する光は全体の1/4と考えられる。この物体を再生する光が海の波では波浪制御領域を静穏にするのであるから、最大25%波浪制御可能と考えられる。この25%にほぼ近い30%程度波浪制御可能であることを確認したことになる。最大30%程度の波高低減効果は、そのままでは波浪制御構造物としては不十分である。今後位相ホログラムに相当する多数列構造にするなどの工夫が望まれる。

また一方で構造物前面で波高の高くなる領域が認められるので注意が必要となる。したがって円柱杭群を利用した消波構造物に対しては思わぬところで波高が高くなったりする危険性があるのでホログラフィ的な波浪制御状況の検査が必要であると言える。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始変わらぬ懇切な御指導、御教示を賜り、本論文をまとめる機会をお与えいただきました神戸大学工学部 筧 源亮教授に衷心より厚く御礼申し上げます。また、本論文をまとめるにあたり有益な御助言をいただいた神戸大学工学部 櫻井 春輔教授、木村 雄吉教授に深く感謝申し上げます。

神戸大学工学部 道奥 康治助教授、瀬良 正憲助手には著者が内地研究員として神戸大学において研修以来多くの御助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

最後に本研究の遂行にあたって多大な御協力と御理解をいただいた神戸大学工学部土木工学教室水工学研究室の各位、明石工業高等専門学校土木工学科の各位、ならびに同計算機センター各位、同電気工学科ワークステーションに関係の各位に心から感謝申し上げます。