

波浪発電用集波装置の開発

岩 永 正 裕・山 岸 陽 一

A Development of Apparatus Converging Ocean Waves on Wave Power Converter

Masahiro IWANAGA and Yōichi YAMAGISHI

Abstract

The purpose of this paper is to develop an apparatus converging ocean wave energy on a wave power converter like an optical convex lens.

We found that wave energy converged on a point of the flat square plate submerged horizontally. We studied the conditions experimentally under which more wave energy was concentrated on the plate.

As a result, when the side length of square is 0.66 times wavelength and the depth of plate is 0.04 times wavelength, the most wave energy is concentrated on a point of the plate. The maximum ratio of energy density reached 31.

1. ま え が き

本研究は分散している沖合の低密度の波浪エネルギーを波浪発電装置に収束させることのできる集波装置の開発を目的とする。

凸レンズは光を一点に集めることができる。これと同じように海の波のエネルギーを集めることのできる物体（集波装置）があれば、小型の波浪発電装置を用いて大量の発電を行うことができるであろう。

海の波は水深によって波速が変化し、浅くなると遅くなる。この性質を利用すれば光のレンズと同様に波の屈折現象を用いた集波装置を作ることができるように思われる。しかし海の波は波長が長く、よほど大きな物体を作らなければ屈折現象だけで集波効果を期待することはできない。

波長と集波装置が同程度の大きさである場合、屈折現象よりも回折現象が強く現れる。そこで本研究では波の回折現象を利用して波のエネルギーを集める装置の開発を行う。実験には $4 \times 1 \times 0.75$ mの波浪水槽を使用した。

正方形の平板を水中に水平に没して実験すると、平板上の一部にかなりのエネルギーが集中することがわ

かった。そこで水深、波長を変化させて、どのような条件でエネルギーの集中が見られるかを調べる。

記 号

B : 正方形平板の一辺の長さ

C : 焦点距離（平板中心からの距離）

E : 位置エネルギー密度

E_0 : 集波装置を設置しない場合の位置エネルギー密度

E_{max} : 最大位置エネルギー密度（焦点における位置エネルギー密度）

E_{max}/E_0 : 最大位置エネルギー密度比

g : 重力加速度

H : 平板を沈めた水深

h : 波高（水位変動の両振幅）

h_0 : 集波装置を設置しない場合の波高

h/h_0 : 波高比

h_{max}/h_0 : 最大波高比（焦点における波高比）

n : 整数

T : 周期

t : 時間

x : 平板の中心を原点とする波の進行方向の座標

- y : 平板の中心を原点とする波の進行方向と直角方向の座標
 $\eta(t)$: 波高 (波による水位変動)
 λ : 波長
 λ_b : 水深 H に無限平板を置いた場合の波長
 ρ : 密度

2. 実験装置及び方法

2.1 波浪水槽と供試集波装置

実験装置は Fig. 1 に示すようなもので、塩ビ製幅 1 m、高さ 0.75 m、長さ 4 m の水槽を製作し使用した。水深は約 50 cm で実験を行った。波消し装置として造波装置の手前と水槽後端にビニールパイプ製の簾を使用した。

Fig. 2 のように造波装置としてプランジャー式造波装置を製作し使用した。50×50×965 mm のアルミ製アングルをプランジャーとし約 10 mm の振幅で上下させて波を起こした。周期 T は 0.3~0.5 s の範囲で実験を行い、波長 λ は 15~35 cm、波高は 0.6~5 mm で

あった。

供試集波装置は一边 20 cm の正方形とし厚さ 2 mm のアクリル板で作成し、Fig. 3 のような支持台に設置して、水深 H を 5~21 mm の範囲で変化させて実験を行った。

2.2 波高計測装置

Fig. 4 のような波高計測装置を製作して使用した。液体中に二本の電極を入れ交流電圧を加えることにより電気分解せずに液体の電気抵抗を計測できることは古くから知られており、液中の電極の長さによって抵抗値が変化することを利用した。

発振器により交流電圧を発生させ (約 8 KHz を使用) 増幅器を通して 2 本の電極 (1.2 ϕ のステンレス棒を使用。以後端子と呼ぶ) に加圧する (Fig. 5-1)。抵抗 (約 1 Ω) を介して電流に比例する電圧を取り出す (Fig. 5-2)。それを増幅整流して 8 KHz の電圧信号の振幅に比例する電圧 (Fig. 5-3) に変換する。この電圧と端子が水中に没している長さは Fig. 6 のように直線関係にあり、水位変動を計測できることがわかる。波高の計測にあたっては 2~3 時間おきに検定を行い水

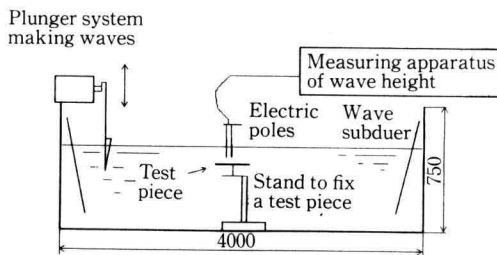


Fig. 1. Experimental apparatus.

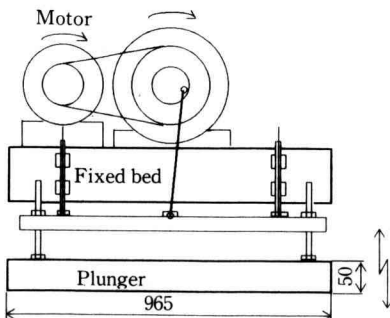


Fig. 2. Plunger system making waves.

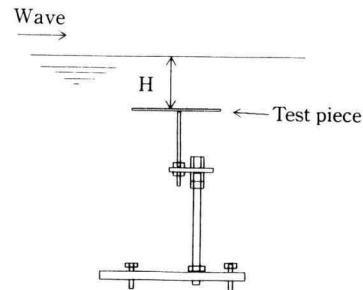


Fig. 3. Stand to fix a test piece.

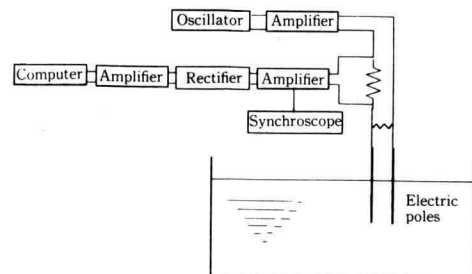


Fig. 4. Measuring apparatus of wave height.

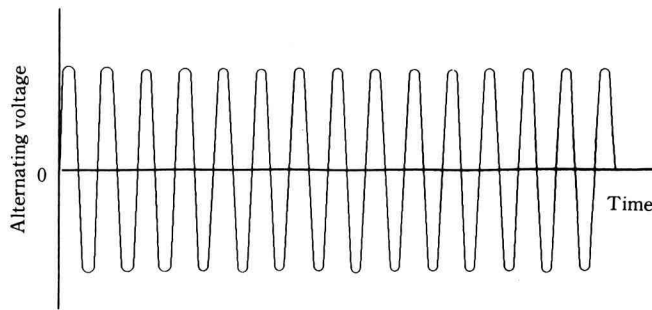


Fig. 5-1. Alternating voltage applied to electric poles.

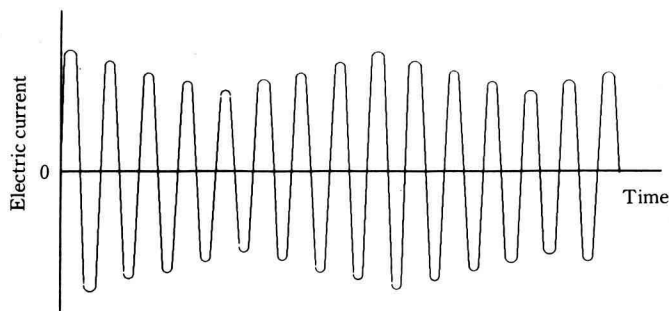


Fig. 5-2. Electric current changed by wave.

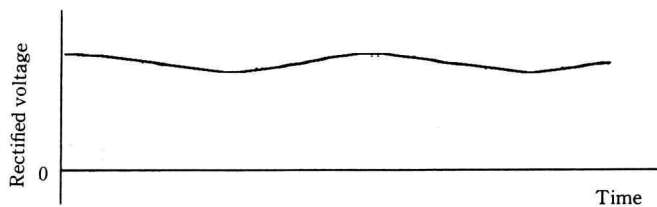


Fig. 5-3. Rectified voltage for measuring wave height.

温等による特性の変化を補正した。計測電圧は 12 bit で AD 変換して数周期分のデータ（1 チャンネルにつき 500 個）をパーソナルコンピュータに取り込んで計算処理した。取り込み周波数は 500 Hz である。

端子は水平面内を波浪水槽の長手方向に 1 m、幅方向に 0.8 m の範囲で移動できる台に保持されている。ある点の波高を計測するにあたって以下のようなことに留意して実験を行った。波浪水槽には波消しを用意したがその完全な効果を期待することはできない。そこで造波装置を始動してから反射波が測定点に戻ってくるまでの間にパーソナルコンピュータへのデータ取り込みを終了する。すなわちディスプレイ上のリアル

タイムの水位変動を表す Fig. 7 のようなグラフを観察し、造波装置始動後測定点の波高が増加し一定になるのを待って取り込みを開始して Fig. 8 のようなデータを得る。

2.3 波高値の計算処理

パーソナルコンピュータに取り込まれた水位変動のデータから以下のような計算処理をして波高値 h を求めた。

- (i) 最大最小値による波高：水位変動データの最大最小値の差。
- (ii) 極大極小値による波高：水位変動データの各

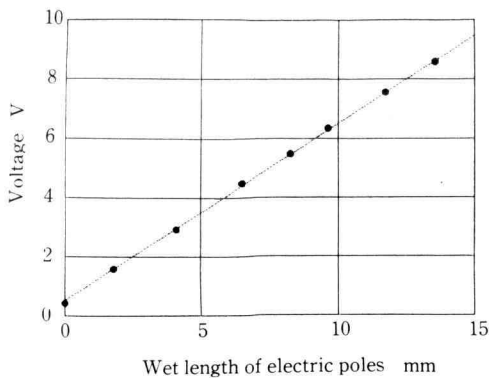


Fig. 6. Relation between measured voltage and wet length of electric poles.

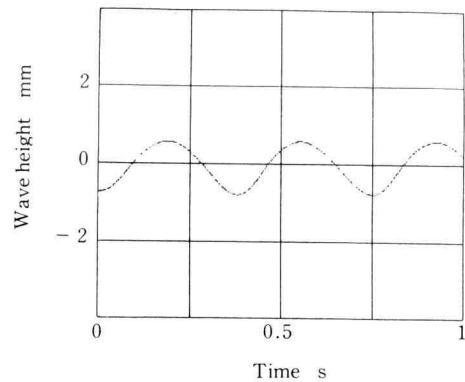


Fig. 8. Example of input data.

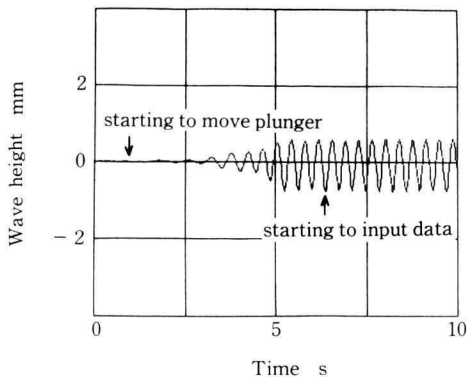


Fig. 7. Transition of wave height observed realtime on the display.

ギ密度（単位面積当りの位置エネルギー）の平均値を算出する。

$$E = \int_0^{nT} \frac{1}{2} \rho g \{\eta(t)\}^2 dt / (nT) \dots \dots \dots (1)$$

ここに $\eta(t)$ は波高を表し、 t は時間、 ρ は密度、 g は重力加速度、 T は周期、 n は整数を表す。以後式 (1) から求めた E の値を位置エネルギー密度と呼ぶ。

$\eta(t)$ がサインウェーブ状に変化する場合は E の値は $\rho g h^2 / 16$ となるので、サインウェーブ状の波に換算して次式により波高を求めた。

$$h = 4\sqrt{E/\rho g} \dots \dots \dots (2)$$

周期における極大極小値の差から求めた波高値の数周期分の平均値。

- (iii) 位置エネルギー密度による波高：測定点の数周期分の波高データから次式により位置エネルギー

(i)～(iii) の波高の値は波形がサインウェーブ状の場合にはよく一致するが、波形がそれからずれるに従って一致しなくなる。本研究では波高として位置エネルギーに直接関係する (iii) の計算値 (式(2)) を採用

Table 1. Values of experimental conditions and results corresponding 3 cases of Fig. 9.

Fig. 9	Experimental conditions					Results of experiment		
	Side length of the square plate B mm	Wave length λ mm	Depth of the plate H mm	Measuring area		Focal distance C mm	Maximum value of wave height ratio h_{\max}/h_0	Maximum value of potential energy density ratio E_{\max}/E_0
				x/B	y/B			
(a)	200	300	5	-0.5~0.7	-0.5~0.5	40	1.4	2.0
(b)	200	300	11	-0.6~0.6	-0.6~0.6	68	5.6	31.4
(c)	200	300	20	-0.5~0.7	-0.5~0.5	75	1.9	3.6

し、位置エネルギー密度 (式(1)) とともに実験結果を整理する。

2.4 波高比と位置エネルギー密度比の計算

集波装置の集波効果を調べるにあたり、位置エネルギー密度比を求める。これは各測定点における集波装置を設置した場合と設置しない場合の位置エネルギー密度の比を言い、次のようにして求めた。集波装置を設置する前に、各測定点における位置エネルギー密度 E_0 の分布をあらかじめ計測する。集波装置を設置し、同周期、同振幅で造波装置を作用して位置エネルギー密度 E を計測し、先程計測した値で割って位置エネルギー密度

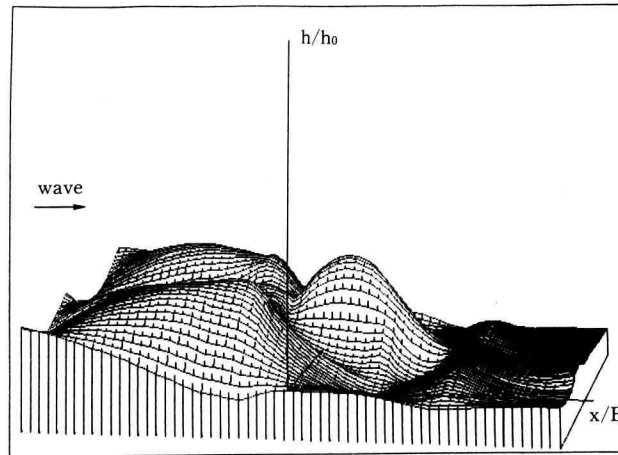
比 E/E_0 を求める。波高比 h/h_0 は次式で与えられる。

$$h/h_0 = \sqrt{E/E_0}$$

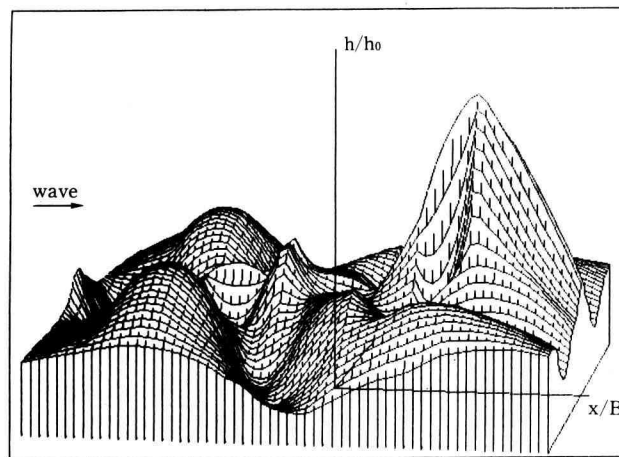
3. 実験結果

3.1 波高比分布

一例として、一辺 20 cm の正方形を水深 5, 11, 20 mm と変化させて沈め、波長 30 cm の波を与えた場合の波高比分布の 3 次元表示を Fig. 9 に示す。波は左から右に、進んでいる。波高比が最大となる点 (以後焦点と呼ぶ) は正方形中心より後方にあることがわか



(a) Depth of the plate, $H = 5$ mm.



(b) Depth of the plate, $H = 11$ mm.

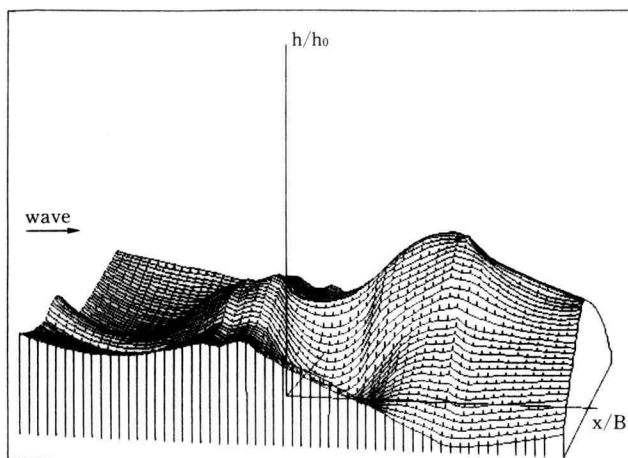
(c) Depth of the plate, $H = 20$ mm.

Fig. 9. Distribution of wave height ratio on the square plate.

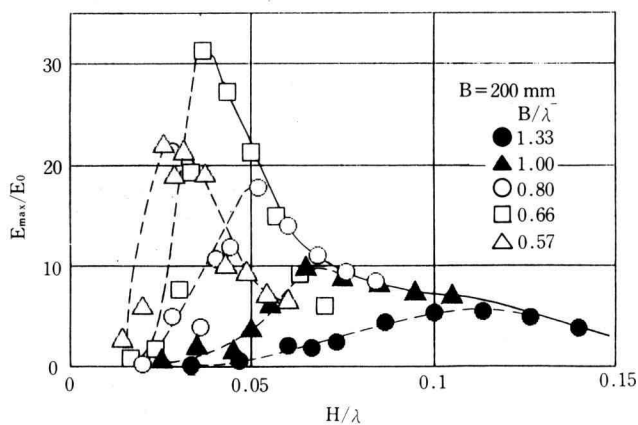


Fig. 10. Energy density ratio and depth of the plate.

り、正方形中心からの距離を焦点距離 C と呼ぶ。この点の波高比を最大波高比 h_{max}/h_0 、位置エネルギー密度比を最大位置エネルギー密度比 E_{max}/E_0 と呼び、これらの値を Table 1 に示す。焦点は水深 H が深くなるほど後方に移動し、最大波高比は水深 11 mm の場合が最も大きいことが分かる。

3.2 最大位置エネルギー密度比の水深、波長による変化

Fig. 10 は一辺 20 cm の平板上の最大位置エネルギー

密度比 E_{max}/E_0 と水深 H /波長 λ の関係を示し、次のことがわかる。正方形の一辺の長さ B /波長 λ が 0.66 より大きな場合に H/λ が減少すると、 E_{max}/E_0 は実線の外捜線に沿って増加し、 H/λ のある値で極大となり、外捜線を離れて減少する。 B/λ が 0.66 より小さい場合に H/λ を減少させると、 E_{max}/E_0 は実線の外捜線から外れて増加し、極大となる。 E_{max}/E_0 の極大値は B/λ が小さいほど増加し B/λ が 0.66 で最大となる。

設置した正方形平板と同水深に無限の平板を置いたときの同周期の波の波長を λ_0 とする。Fig. 11 は

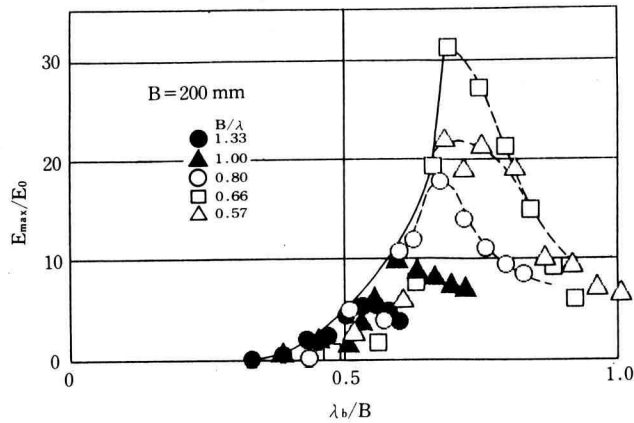


Fig. 11. Energy density ratio and wave length on the plate.

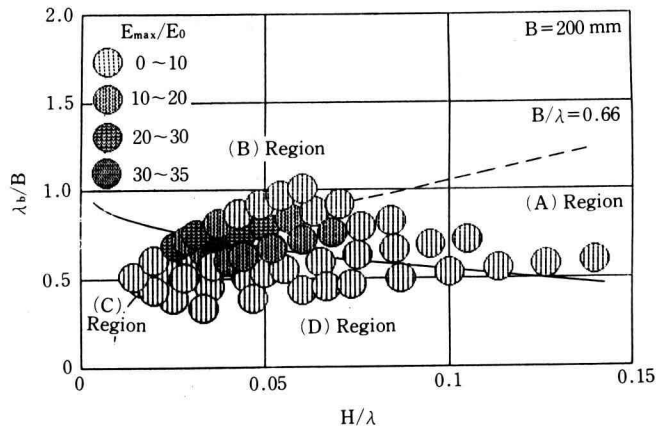


Fig. 12. Transition of energy density ratio with depth of the plate and wave length on it. The depth of color indicates the degree of energy concentration.

E_{max}/E_0 と λ_b/B の関係を示しており、次のことがわかる。 λ_b/B が増加すると E_{max}/E_0 は実線の外捜線に沿って増加し、 λ_b/B のある値で極大となり、外捜線を離れて減少する。これは Fig. 10 で E_{max}/E_0 の極大点より H/λ が小さい部分 (外捜線から外れる部分) が一本の外捜線にまとめられることを意味する。

Fig. 12 は縦軸に λ_b/B 、横軸に H/λ をとって実験点を示したもので、濃淡が E_{max}/E_0 の大小を表す。破線は $B/\lambda=0.66$ を表し、実線は B/λ 一定のもとで E_{max}/E_0 が極大となる点を結んだものである。図のように (A)、(B)、(C)、(D) 領域を定義すると、(A) 領域は Fig. 10 において H/λ によって E_{max}/E_0 が一本の外捜線で表される実験点对应し、(D) 領域は Fig. 11 に

において λ_b/B によって E_{max}/E_0 が一本の外捜線で表される実験点对应する。

以上をもとに E_{max}/E_0 と H/λ 、 B/λ の関係の概略を 3 次元表示したものを Fig. 13 に、 E_{max}/E_0 と H/λ 、 λ_b/B の関係の概略を 3 次元表示したものを Fig. 14 に示す。これらより E_{max}/E_0 は (A) 領域の曲面と (D) 領域の曲面が交わる曲線上の $B/\lambda=0.66$ の条件を満足する点で最大となることがわかる。 E_{max}/E_0 の最大値は 31 ($h_{max}/h_0=5.6$) でありこのとき $H/\lambda=0.037$ 、 $\lambda_b/B=0.69$ であった。

3.3 焦点距離の水深、波長による変化

Fig. 15 は一辺 20 cm の平板上の焦点距離 C の変化

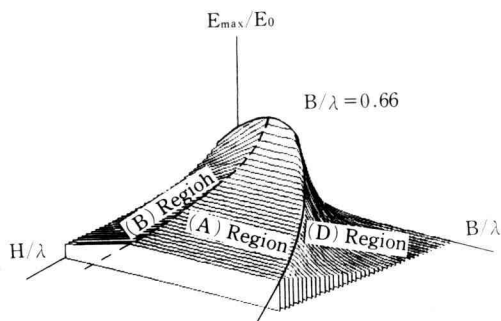


Fig. 13. Schematic change of energy density ratio with depth and side length of the square plate.

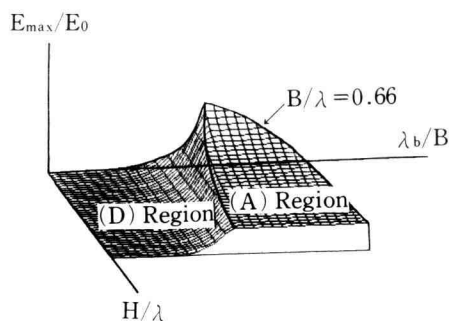


Fig. 14. Schematic change of energy density ratio with depth and wave length on the plate.

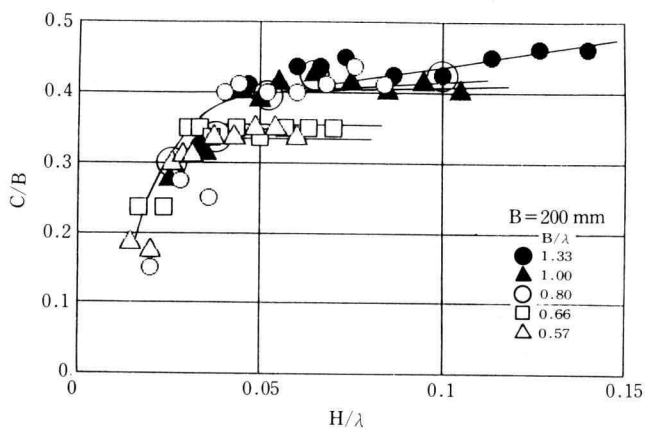


Fig. 15. Focal distance and depth of the plate.

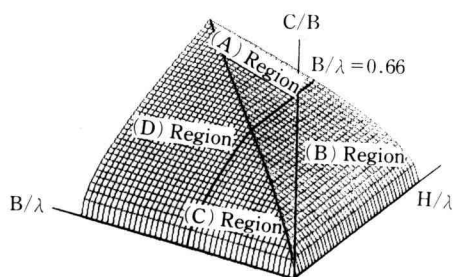


Fig. 16. Schematic change of focal distance with depth and side length of the square plate.

りも大きくなると外捜線を離れて一定となる。この C/B の一定値は B/λ が大きいほど大きく、焦点が正方形後縁に近づく。

Fig. 16 は C/B と H/λ , B/λ の関係を 3 次元表示したものである。

4. む す び

正方形の平板を水中に水平に設置して、水深、波長の大きさを变化させて、どのような条件で波浪エネルギーが集まるかを明かにした。得られた最大の位置エネルギー密度比は 31 倍（最大の波高比は 5.6）であった。

を示したもので、縦軸に C/B 、横軸に H/λ を取った。 H/λ が増加すると、 C/B は実線の外捜線に沿って増加し、 H/λ が E_{max}/E_0 の極大点（円で囲んだ点）の値よ

5. 謝 辞

本研究は本学4年次卒業研究として行われたものであり、下記の諸君の協力を得た。ここに謝意を表します。

氏井 安雄，大島 克彦，山本 和司
関山 好浩，瀬戸 康蔵，十河 康雄

市川 昇一，春山 直輝，廣野 邦和
金沢 昌志，鈴木喜一郎，永井 金光
齊藤 和実，村木 進一，村田 昌幸
阿部 孝，上田 隆浩
永田 勝巳，長橋 敏男
望月 敬，森谷 昌一