

海洋波集波レンズ ——集波レンズの大きさ——

Ocean Wave Focusing
——Dimension of the Lens——

木 下 健*・村 重 淳*
Takeshi KINOSHITA and Sunao MURASHIGE

1. は じ め に

前報¹⁾で著者らは、レンズの形状を細長体と仮定することにより、集波を表すポテンシャルを示した。本報では、そのポテンシャルを利用して自由表面変位を計算することにより、最良の集波効果を与える波長、レンズの長さ、焦点距離の関係を求める。

2. 計 算 方 法

集波効果を調べるために、自由表面変位を計算する。座標系は静水面を xy 面、鉛直下方を z 軸の正方向とする。自由表面変位 ξ と速度ポテンシャル Φ ($v = -\text{grad } \Phi$) の関係は、

$$\xi(x, y, z; t) = -\frac{1}{g} \left[\frac{\partial}{\partial t} \Phi(x, y, z; t) \right]_{z=0} \quad (1)$$

で表される。物体を、 $x=0$, $y=-L/2 \sim L/2$ に置き、正の x 軸方向に進む波を $x=l$, $y=0$ に集めることを考える。速度ポテンシャル Φ を

$$\Phi(x, y, z; t) = \text{Re} \left\{ \frac{ig\alpha}{\omega} \phi(x, y, z) e^{i\omega t} \right\} \quad (2)$$

のように無次元化すると (g は重力加速度、 ω は入射波の角振動数、 α は入射波の振幅)、far fieldポテンシャル ϕ は前報より、

$$\begin{aligned} \phi(x, y, z) = & \frac{1}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ \left[\sigma(y') + \mu(y') \frac{\partial}{\partial x'} \right] \right. \\ & \left. G(x, y, z; x', y', z') \right\}_{x'=0, z'=0} dy' \\ & + \phi_0(x, z) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \sigma(y') &= \frac{i}{2} + A(y') e^{i\theta} \sigma_{ring}(y') \\ \mu(y') &= \frac{1}{2K} + A(y') e^{i\theta} \mu_{ring}(y') \\ \sigma_{ring}(y') &= \frac{K}{4i} \frac{\ell}{r'} \sqrt{\frac{2}{\pi K r'}} \exp \left[i \left(K r' - \frac{3}{4} \pi \right) \right] \\ \mu_{ring}(y') &= -\frac{1}{4i} \sqrt{\frac{2}{\pi K r'}} \exp \left[i \left(K r' - \frac{1}{4} \pi \right) \right] \\ A(y') &= \left[|\sigma_{ring}(y') + iK\mu_{ring}(y')|^2 \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. + |\sigma_{ring}(y') - iK\mu_{ring}(y')|^2 \right]^{-1/2} \\ G(x, y, z; x', y', z') &= \sqrt{\frac{8\pi K}{R}} \exp \left[-K(z+z') - iKR - i\frac{\pi}{4} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r' &= (y'^2 + \ell^2)^{1/2} \\ R &= \{ (x-x')^2 + (y-y')^2 \}^{1/2} \\ \phi_0 &= \exp[-Kz - iKx] \end{aligned}$$

で、 K は波数、 ℓ は焦点距離、 ϕ_0 は入射波ポテンシャルを表す。また、無限水深の場合を考えているので、

$$K = \frac{\omega^2}{g} \quad (4)$$

となる。この特異点分布は、 $x > 0$ 半面で、Kochin関数(無限遠方での波振幅に比例する関数)が円筒波になるように与えられている。したがって、(1)、(3)式より自由表面変位 ξ が計算できる (θ は任意にとりうるが、以下の計算は $\theta = 0$ として行った)。

3. 細長体理論の仮定

前報でfar fieldポテンシャル(3)式を求めた際に導入した、いくつかの仮定をここで整理する。物体の長さを L とする。

1) $KR \rightarrow \infty$

自由表面変位の計算で三次元グリーン関数の近似、前報の(9)式を導入している。波長 λ が十分小さいか、特異点からの距離が十分大きいときに成り立つ。

2) $r \gg x', y'$ (ここで、 $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$)

outer solutionのouter expansionを求めるときに導入した。本論の場合は、 $x'=0$ であるから、 x が十分大きいときに成り立つ。

3) $L \rightarrow \infty, K \rightarrow \infty$

特異点分布を求める積分方程式を解くときに導入した。物体の長さ L が十分大きいとき、波長 λ が十分小さいとき成り立つ。

4) $Kr' \rightarrow \infty$

特異点分布で表れるHankel関数の漸近展開近似を導入した。波長 λ が十分小さいか、焦点距離 ℓ が十分長いときに成り立つ。

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究 速 報

本論では、(3)式のように、outer solutionから自由表面変位 ξ を計算しているので、仮定2)は関係無い。その他の仮定がどの程度有効で、どのような条件で設計すればよいかを調べるために、焦点距離 ℓ 、物体の長さ L 、波長 λ と集波効果の関係を(1)、(3)式から自由表面分布を数値計算することにより調べる。

4. 結 果

焦点距離 ℓ 、物体の長さ L 、波長 λ をそれぞれ、 $\ell=2.0$

m 、 $L=4.0m$ 、 $\lambda=0.25m$ に設定すると、自由表面変位は、Fig. 1のようになり、適当な集波効果が得られる(入射波の振幅 a は $1.0cm$ として図中の z 軸は 100 倍に拡大している)。ここで、波は正の x 軸方向に進み、物体は $x=0$ 、 $y=-L/2\sim L/2$ に置いてある。以下、各パラメータの影響を調べるためにFig. 1を基準にして比較を行う。

4.1 焦点距離の影響

Fig. 1のもと、 L 、 λ は同じにして、 ℓ を $1.0m$ (Fig.

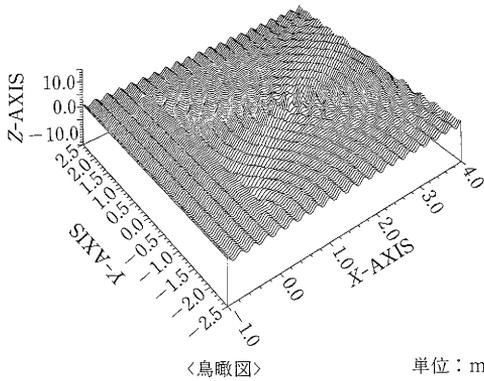


Fig. 1 自由表面変位 ($\ell=2.0m$ 、 $L=4.0m$ 、 $\lambda=0.25m$)

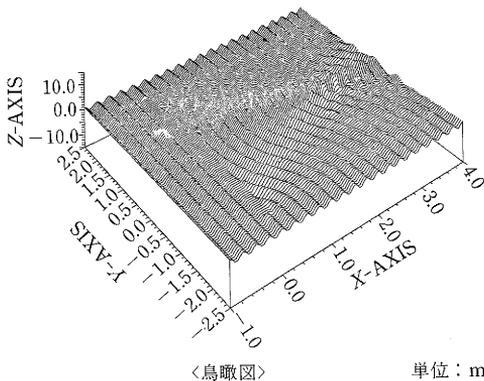
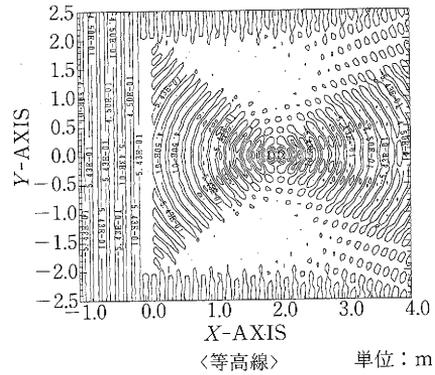


Fig. 2 自由表面変位 ($\ell=1.0m$ 、 $L=4.0m$ 、 $\lambda=0.25m$)

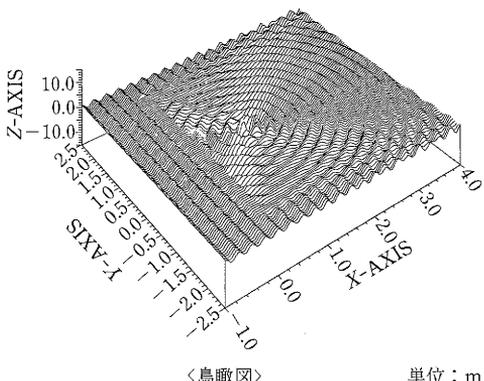
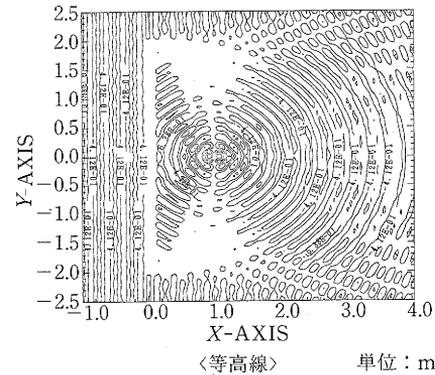
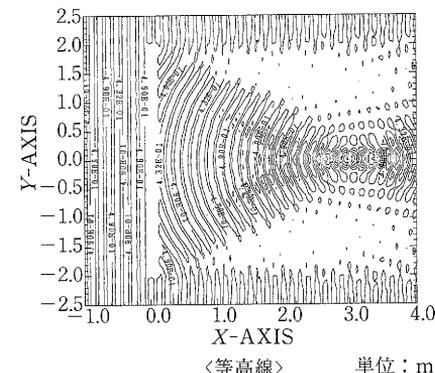


Fig. 3 自由表面変位 ($\ell=3.0m$ 、 $L=4.0m$ 、 $\lambda=0.25m$)



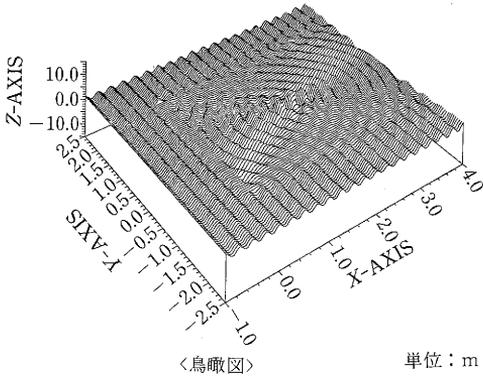
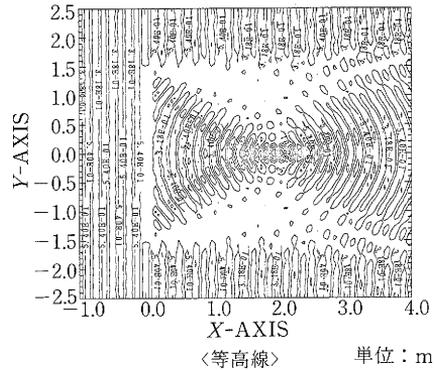


Fig. 4 自由表面変位 ($l=2.0m, L=3.0m, \lambda=0.25m$)



〈等高線〉

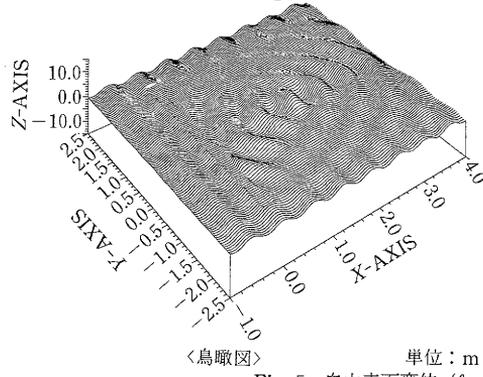
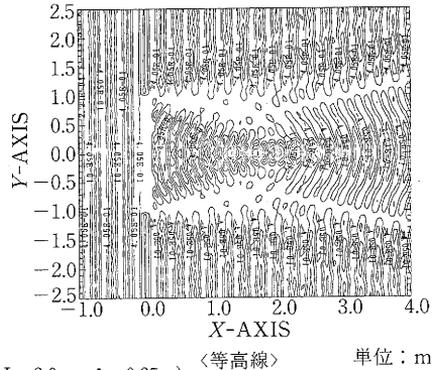


Fig. 5 自由表面変位 ($l=2.0m, L=2.0m, \lambda=0.25m$)



〈等高線〉

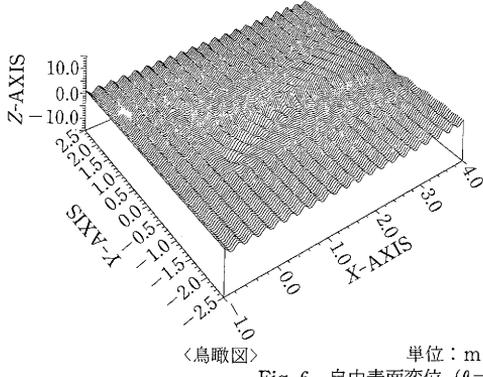
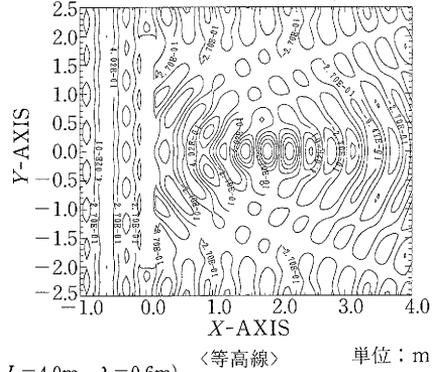


Fig. 6 自由表面変位 ($l=2.0m, L=4.0m, \lambda=0.6m$)



〈等高線〉

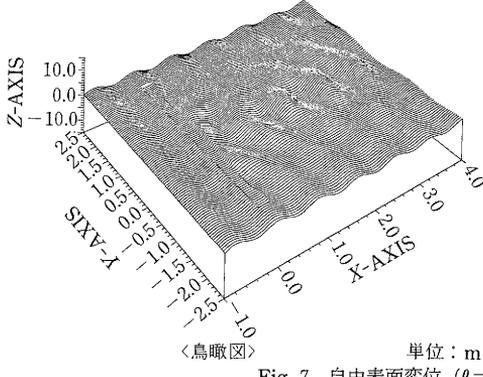
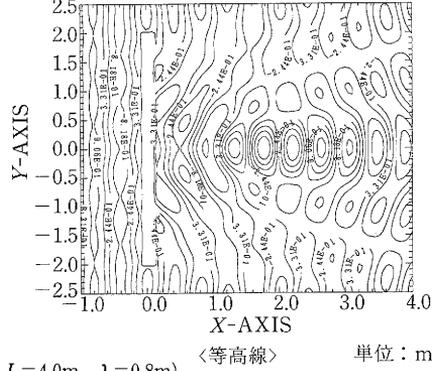


Fig. 7 自由表面変位 ($l=2.0m, L=4.0m, \lambda=0.8m$)



〈等高線〉

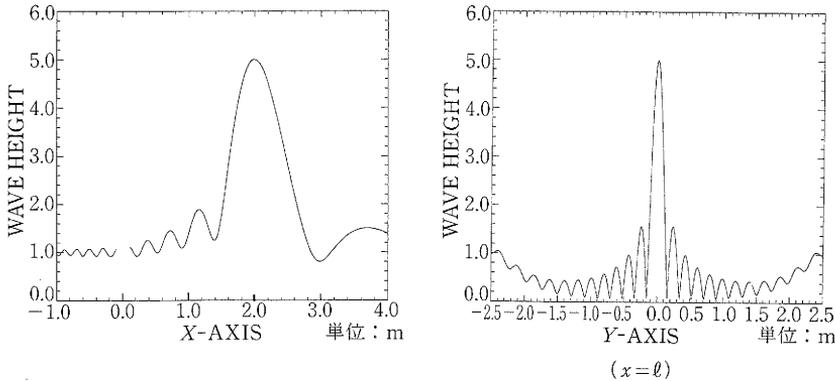


Fig. 8 波高分布 ($\ell=2.0\text{m}$, $L=4.0\text{m}$, $\lambda=0.25\text{m}$)

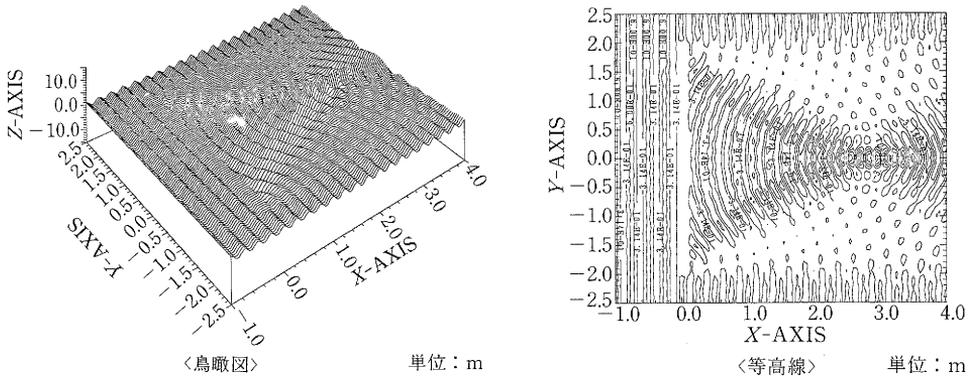


Fig. 9 SNAKE型集波 ($L=4\text{m}$, $\lambda=0.25\text{m}$)

2), 3.0m (Fig. 3) にした。前節の仮定4)によれば、焦点距離が長いほど良い近似を示すはずであるが、長すぎると本来の集波レンズの目的から離れてしまう。また、短すぎると十分な静穏領域が確保できない。したがって、Figs. 1, 2, 3より、 $L/2 \approx \ell$ が適当であると考える。

4.2 レンズの長さの影響

Fig. 1のものと、 ℓ, λ は同じにして、 L を3.0m (Fig. 4), 2.0m (Fig. 5) にした。前節の仮定3)によれば、物体の長さが長いほど良い近似を示すはずである。Figs. 1, 4, 5より、 $L/2 \approx \ell$ が適当であると考える。

4.3 波長の影響

Fig. 1のものと、 ℓ, L は同じにして、 λ を0.6m (Fig. 6), 0.8m (Fig. 7) にした。前節の仮定1), 4)より、波長が短いほど良い近似を示すはずである。Figs. 1, 6, 7より、 $\ell \geq 3\lambda$ が適当であると考える。

4.4 集波効果

集波効果を、より定量的に調べるために、 $y=0$ での波高分布と $x=\ell$ での波高分布を調べた (Fig. 8)。与えた条件は、Fig. 1と同じである。焦点で入射波の約5倍の波高が得られている。

4.5 Snake型集波との比較

(3)式はKochin関数を円筒波にするような特異点分布により集波を表しているが、前報で示したようにSnake型造波機を特異点分布で表す考え方を応用しても集波は表現できる。その考え方に基づいたfar fieldポテンシャルを利用して自由表面分布を計算すると、Fig. 9 ($L=4.0\text{m}$, $\lambda=0.25\text{m}$) のようになる。設計時の焦点より少し近くに集波されているが、集波の様子は、(3)式より得られる結果と非常によく似ていることがわかる。

5. ま と め

前報で得られた集波ポテンシャルを利用して、自由表面変位の数値計算を行った。焦点距離 ℓ 、物体の長さ L 、波長 λ と集波効果の関係を調べ、それらが $L/2 \approx \ell \geq 3\lambda$ を満たすように設定すると適当な集波効果が得られ、焦点では、入射波の約5倍の波高が得られることがわかった。今後は、本論で得られた結果と前報で得られた物体の二次元断面形状が満たすべき条件を設計の指針として実際にレンズを作成し、実験を行う予定である。

(1989年7月7日受理)

参 考 文 献

1) 木下 健, 村重 淳, 海洋波集波レンズ—細長体理論による特異点分布—, 生産研究, 第41巻, 10号.