

# 1966年の26号台風による静岡県吉原海岸における異常高潮発生の理論的背景とその対策について

日本大学工学部

西本勝之

## Abstract

1966年秋の26号台風によって静岡県吉原海岸には異常高潮が発生し、それが当時高き13mの breakwater を越えて陸上深く浸入して多大の人命をとり、また多額の物質的損害をこうむったことはまだ記憶に新しいところと思う。此の論文においてはこの異常高潮発生の理論的背景および高潮に対する研究の結果が報告されている。すなわち高潮を重力波として取扱ひ、流体力学の基礎理論から出発して、駿河湾の形、海底の形および駿河湾に対する吉原海岸の相対的位置と理論的に考察することによって、吉原海岸が異常高潮に襲われたことの必然性を示し、条件さえ整えば当時の高潮よりも高きもの異常高潮の発生があり得ることを示した。そしてさらにこれに対する防御の方法として著者は double layer breakwater 或は triple layer breakwater を示し、特に double layer breakwater についてはその間隔および2の breakwater の高さなどについても考察を行い、その結果も併せて報告した。

## Chap. 1. Theoretical consideration

### §1. Introduction

横座標  $x$  軸に沿ってその断面積  $S$  が連続的に漸次変化する canal においては long water wave の表面の vertical displacement  $y$  はつぎの偏微分方程式の解として与えられる。<sup>(1)</sup>

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{g}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad \dots (1) \quad \text{これより} \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{g}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left( bh \frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad \dots (2) \quad \text{と得る。}$$

ここに  $g$ ,  $b$ ,  $h$  はそれぞれ重力、重力による加速度、canal の幅および深さである。

ここで canal mouth においては water elevation  $y$  は周期的に変化するものとし、 $\omega$  をその angular frequency とし

$$y(x, t) = e^{i\omega t} X(x) \quad \dots (3) \quad [0 \leq x \leq l, \quad l: \text{canal の長さ}]$$

とおくと、式(3)を(2)に用いて  $X(x)$  が満足すべき微分方程式として次式を得る。すなわち

$$\frac{g}{b} \frac{d}{dx} \left( bh \frac{dX}{dx} \right) + \omega^2 X = 0 \quad \dots (4)$$

### §2. Solutions in the case of $b = K_1 x^{\lambda_1}$ and $h = K_2 x^{\lambda_2}$

$\lambda_2 \neq 2$  の場合は  $b = K_1 x^{\lambda_1}$ ,  $h = K_2 x^{\lambda_2}$  [ $K_1, K_2$ ; const.] を式(4)に用いると式(4)は

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{x} \frac{dX}{dx} + \frac{\sigma^2}{x^{\lambda_2}} X = 0 \quad \dots (5) \quad \left[ \sigma = \frac{\omega}{\sqrt{g K_2}} \right]$$

となり、この方程式の一般解は次の通りである。

$$X(x) = x^{\frac{1-(\lambda_1+\lambda_2)}{2}} \left\{ A J_{\frac{1-(\lambda_1+\lambda_2)}{2-\lambda_2}} \left\{ \frac{2\omega}{(2-\lambda_2)\sqrt{g K_2}} x^{\frac{2-\lambda_2}{2}} \right\} + B Y_{\frac{1-(\lambda_1+\lambda_2)}{2-\lambda_2}} \left\{ \frac{2\omega}{(2-\lambda_2)\sqrt{g K_2}} x^{\frac{2-\lambda_2}{2}} \right\} \right\} \quad \dots (6)$$

ただし  $J$  は1種の Bessel Function で、 $Y$  は2種の Bessel Function である。

### §.3. Consideration on the water elevation in some special section's canals

若干の特別な断面をもつ canal における water wave の vertical elevation は Table 1. に示される通りで、いづれも境界条件  $y(l, t) = y_0 \cos \omega t \dots (7)$  を満足する解である。Table 1. の No. [I], No. [II], ..., No. [XV] の解に対する canal の形状はそれぞれ Fig. 1, Fig. 2, ..., Fig. 12 に示される通りである。[実験的な結果の報告がある。(2)]

Katsuyuki NISHIMOTO

Table 1. List of the solutions for some sets of  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ , under the boundary condition  $y(l, t) = y_0 \cos \omega t$ .

| No.      | $\lambda_1$   | $\lambda_2$   | Solution under the boundary condition $y(l, t) = y_0 \cos \omega t$ .                                                                                                                                                                         |
|----------|---------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [ I ]    | 0             | 0             | $y_0 \frac{\cos \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} x}{\cos \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} l} \cos \omega t$                                                                                                                                               |
| [ II ]   | 1             | 0             | $y_0 \frac{J_0 \left( \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} x \right)}{J_0 \left( \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} l \right)} \cos \omega t$                                                                                                                   |
| [ III ]  | 0             | 1             | $y_0 \frac{J_0 \left( \frac{2\omega}{\sqrt{gK_2}} x^{1/2} \right)}{J_0 \left( \frac{2\omega}{\sqrt{gK_2}} l^{1/2} \right)} \cos \omega t$                                                                                                     |
| [ IV ]   | 1             | 1             | $y_0 \frac{x^{-1/2} J_1 \left( \frac{2\omega}{\sqrt{gK_2}} x^{1/2} \right)}{l^{-1/2} J_1 \left( \frac{2\omega}{\sqrt{gK_2}} l^{1/2} \right)} \cos \omega t$                                                                                   |
| [ V ]    | 2             | 0             | $y_0 \frac{x^{-1/2} J_{1/2} \left( \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} x \right)}{l^{-1/2} J_{1/2} \left( \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} l \right)} \cos \omega t$                                                                                         |
| [ VI ]   | 2             | 1             | $y_0 \frac{x^{-1} J_2 \left( \frac{2\omega}{\sqrt{gK_2}} x^{1/2} \right)}{l^{-1} J_2 \left( \frac{2\omega}{\sqrt{gK_2}} l^{1/2} \right)} \cos \omega t$                                                                                       |
| [ VII ]  | 2             | $\frac{1}{2}$ | $y_0 \frac{x^{-3/4} J_1 \left( \frac{4}{3} \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} x^{3/4} \right)}{l^{-3/4} J_1 \left( \frac{4}{3} \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} l^{3/4} \right)} \cos \omega t$                                                             |
| [ VIII ] | $\frac{1}{2}$ | 1             | $y_0 \frac{x^{-1/4} J_{1/2} \left( \frac{2\omega}{\sqrt{gK_2}} x^{1/2} \right)}{l^{-1/4} J_{1/2} \left( \frac{2\omega}{\sqrt{gK_2}} l^{1/2} \right)} \cos \omega t$                                                                           |
| [ IX ]   | 1             | $\frac{1}{2}$ | $y_0 \frac{x^{-1/4} J_{1/2} \left( \frac{4}{3} \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} x^{3/4} \right)}{l^{-1/4} J_{1/2} \left( \frac{4}{3} \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} l^{3/4} \right)} \cos \omega t$                                                     |
| [ X ]    | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $y_0 \frac{J_0 \left( \frac{4}{3} \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} x^{3/4} \right)}{J_0 \left( \frac{4}{3} \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} l^{3/4} \right)} \cos \omega t$                                                                               |
| [ XI ]   | $\frac{1}{2}$ | 0             | $y_0 \frac{x^{1/4} J_{-1/4} \left( \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} x \right)}{l^{1/4} J_{-1/4} \left( \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} l \right)} \cos \omega t$                                                                                         |
| [ XII ]  | 0             | $\frac{1}{2}$ | $y_0 \frac{x^{1/4} J_{-1/4} \left( \frac{4}{3} \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} x^{3/4} \right)}{l^{1/4} J_{-1/4} \left( \frac{4}{3} \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} l^{3/4} \right)} \cos \omega t$                                                     |
| [ XIII ] | 0             | 2             | $y_0 \frac{x^{-1} J_{-1/2} \left( \frac{4}{3} \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} x^{3/4} \right)}{l^{-1} J_{-1/2} \left( \frac{4}{3} \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} l^{3/4} \right)} \cos \omega t \quad \left[ \sigma^2 = \frac{\omega^2}{gK_2} \right]$ |
| [ XIV ]  | 1             | 2             | $y_0 \frac{x^{-1} \log x}{l^{-1} \log l} \cos \omega t \quad [\sigma^2 = 1]$                                                                                                                                                                  |
| [ XV ]   | $\frac{1}{2}$ | 2             | $y_0 \frac{x^{-3/4} \log x}{l^{-3/4} \log l} \cos \omega t \quad \left[ \sigma^2 = \frac{1}{4} \left( \frac{3}{2} \right)^2 \right]$                                                                                                          |

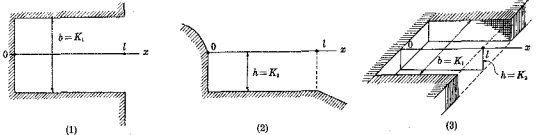


Fig. 1

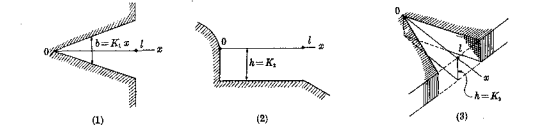


Fig. 2

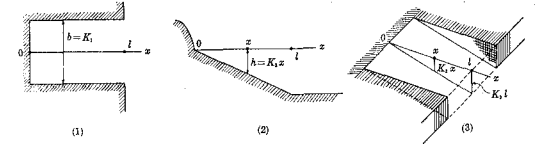


Fig. 3

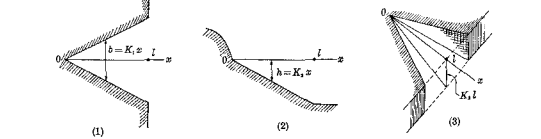


Fig. 4

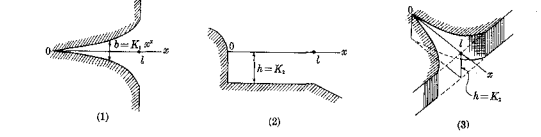


Fig. 5

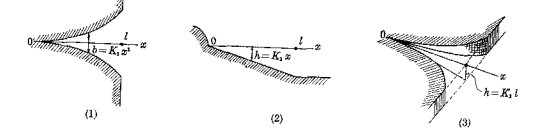


Fig. 6

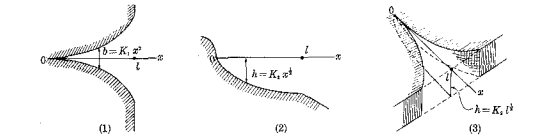


Fig. 7

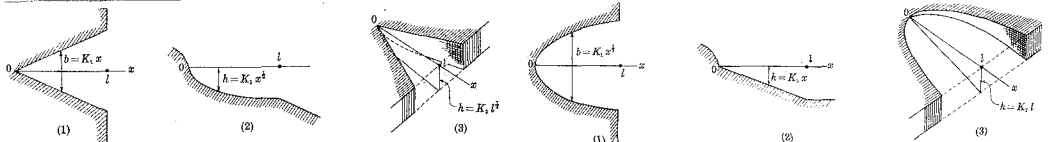


Fig. 8

Fig. 9

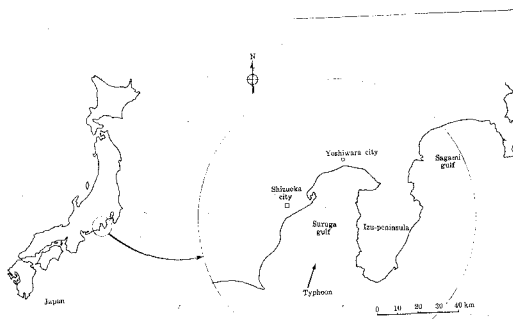


Fig. 14

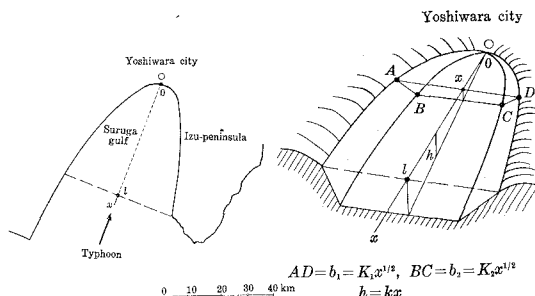


Fig. 15

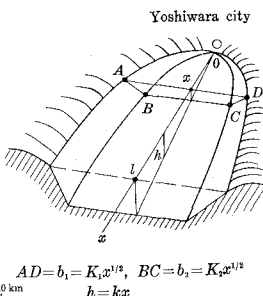
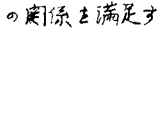
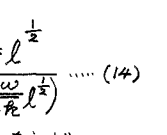
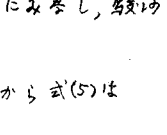
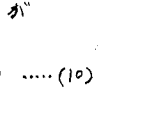
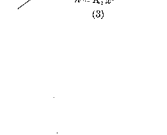
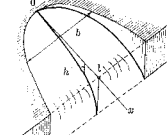
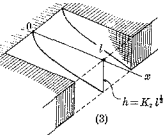
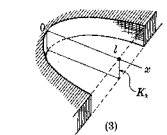
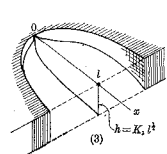
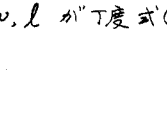
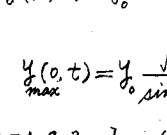
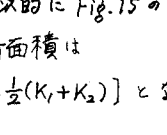
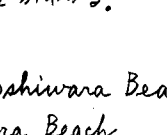
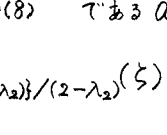
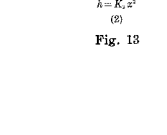
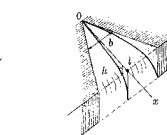
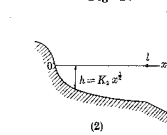
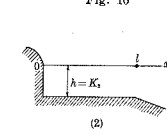
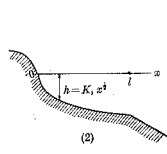
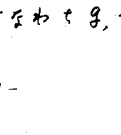
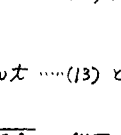
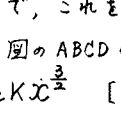
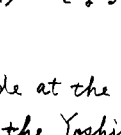
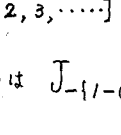
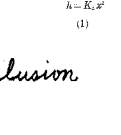
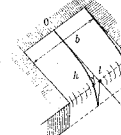
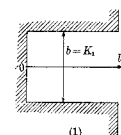
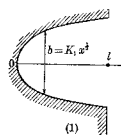
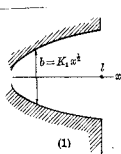


Fig. 16



#### §4. Conclusion

Table 1. の解から明らかなように一般に

$$\frac{2}{(2-\lambda_2)} \cdot \frac{\omega}{\sqrt{gK_2}} l^{\frac{2-\lambda_2}{2}} = a_m \quad [m=1, 2, 3, \dots] \quad \dots (8) \quad \text{である } a_m \text{ が}$$

$$J_{\{1-(\lambda_1+\lambda_2)\}/(2-\lambda_2)}(\xi) = 0 \quad \dots (9) \quad \text{あるいは} \quad J_{-1-(\lambda_1+\lambda_2)\}/(2-\lambda_2)}(\xi) = 0 \quad \dots (10)$$

の正根であるときは

$$y_{\max}(0, t) = \infty \quad \dots (11) \quad \text{となることがわかる。}$$

#### Chap. 2. On the extraordinary high tide at the Yoshiwara Beach

##### §5. The water elevation at the Yoshiwara Beach

吉原海岸の駿河湾に対する位置は Fig. 14 の通りで、これを近似的に Fig. 15 のように置き、駿河湾を Fig. 16 の形および断面をもつ canal と考えると図の ABCD の断面は

$$h \frac{1}{2} (b_1 + b_2) = K l \frac{1}{2} (K_1 + K_2) x^{\frac{1}{2}} = K K x^{\frac{3}{2}} \quad [K = \frac{1}{2} (K_1 + K_2)] \quad \text{となるから式(5)は}$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{3}{2x} \frac{dX}{dx} + \frac{\sigma^2}{x} X = 0, \quad [\sigma^2 = \frac{\omega^2}{gK}] \quad \dots (12) \quad \text{となり、条件 } y(l, t) = y_0 \cos \omega t \quad \text{のもとで}$$

$$\text{water elevation は } y(x, t) = y_0 \frac{x^{-\frac{1}{2}} J_{\frac{1}{2}}(\frac{2\omega}{\sqrt{gK}} x^{\frac{1}{2}})}{l^{-\frac{1}{2}} J_{\frac{1}{2}}(\frac{2\omega}{\sqrt{gK}} l^{\frac{1}{2}})} \cos \omega t \quad \dots (13) \quad \text{となり} \quad y_{\max}(0, t) = y_0 \frac{\frac{2\omega}{\sqrt{gK}} l^{\frac{1}{2}}}{\sin(\frac{2\omega}{\sqrt{gK}} l^{\frac{1}{2}})} \quad \dots (14)$$

となる。式(14)によって前と同様に、もし  $2\omega l^{\frac{1}{2}} / \sqrt{gK} = m\pi \quad [m=1, 2, 3, \dots] \quad \dots (15)$  ならば

$$y_{\max}(0, t) = \infty \quad \dots (16) \quad \text{となることがわかる。すなわち } g, K, \omega, l \text{ が下式(15)の関係式を満足す}$$

るときは吉原海岸においては異常高潮となることが式(16)によつて予めわかる。また  $h=fc^n$  [ $n>0$ ] のときも同様の結果が得られることは明らかである。

### §6. Discussion on the Means of the Protection against the Extraordinary High Tide

[1] 上記の理論の結果によればこの異常高潮を防御することは大変困難である。当時の新聞報道によれば最高の高潮は約21mで、堤防の高さは僅かに13mであり、したがつて多大の損失をこうむつた。しかし前記の理論によれば、たとえ台風のenergyが小さくても21m以上の高潮の発生が充分予想されるわけで、吾々はこの21m以上の高潮に対しても防御の備をしなければならぬ。そこで防御の方法として最も効果的であつて経済的なものとして考えられるのは Fig. 17, Fig. 18 のような double layer breakwater 或は triple layer breakwater である。

[2] double layer breakwater の間隔  $L_0$  と  $\omega$  2 堤防の高さ  $h_2$  について [ $h_1 > h_2 > 0$ ]

又下 Fig. 21, Fig. 22 のように問題を単純にする為、堤防の幅はないものとしてある。又下  $h_1 > h_2 > 0$  とし、 $\omega$  1 堤防の長さ1m当りの越流量を  $V$   $m^3$  とすると次式

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad L_0 &= v t = v \sqrt{\frac{2(h_1 + \delta)}{g}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{を得る。} t \text{ は } (h_1 + \delta) \text{ を自由落下す} \\ h_2 \geq \frac{V}{L_0} \quad [h_2 < h_1] \end{array} \right\} \quad \textcircled{A} \end{aligned}$$

るに要する時間で、この式による  $L_0$ ,  $h_2$  の計算の結果は Table 2 に示される通りである。

この計算式は極めて粗な計算式である。[Fig. 21 参照] 次式

$$\left. \begin{aligned} 2) \quad L_0 &= v t = v \sqrt{\frac{2(h_1 + \delta - h_2)}{g}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{を得る。} t \text{ は } (h_1 + \delta - h_2) \text{ を自} \\ V \leq L_0 h_2 \quad [h_2 < h_1] \end{array} \right\} \end{aligned}$$

由落下すに要する時間で [Fig. 22 参照] この両式より  $L_0$  を決定する式として3次式

$$L_0^3 - \frac{2v^2(h_1 + \delta)}{g} L_0 + \frac{v^2 V}{g} = 0 \quad \textcircled{B} \text{ を得る。この}$$

式による  $L_0$ ,  $h_2$  の計算の結果は Table 3 に示される。式⑥による計算の方がより精確であるがその結果は式④によつて計算したものと余り大きな差異はない。たとえば表2の①と表3の①を比較されない。なお二つの堤防の間に侵入した海水は出来るだけ早く排水するように  $\omega$  1 堤防に片開きの水門を装備せねばならないことは勿論であるが之については省略する。

Table 2.

|   | $V$ $m^3$ | $v$ $m/s$ | $h_1$ $m$ | $\delta$ $m$ | $h_2$ $m$ | $L_0$ $m$ | $h_2$ $m$ | $L_0$ $m$ | 備考 |
|---|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|
| ① | 60        | 10        | 13        | 0            | 3.68      | 16.29     |           |           |    |
|   | 60        | 10        | 13        | 8            |           |           | 2.90      | 20.70     |    |
| ② | 60        | 20        | 13        | 0            | 1.84      | 32.54     |           |           |    |
|   | 60        | 20        | 13        | 8            |           |           | 1.45      | 41.40     |    |

Table 3.

|   | $V$ $m^3$ | $v$ $m/s$ | $h_1$ $m$ | $\delta$ $m$ | $h_2$ $m$ | $L_0$ $m$ | $h_2$ $m$ | $L_0$ $m$ | 備考                                                                 |
|---|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------------------------------------|
| ① | 60        | 10        | 13        | 0            | 4.00      | 14.98     |           |           | この表の $V, v, h_1, \delta$ 等に対して式⑥は3つの相異なる実根をもつた。結果はその中で条件を満足する解である。 |
|   | 60        | 10        | 13        | 8            |           |           | 3.00      | 19.95     |                                                                    |
| ② | 60        | 20        | 13        | 0            | 1.91      | 31.36     |           |           |                                                                    |
|   | 60        | 20        | 13        | 8            |           |           | 1.47      | 40.67     |                                                                    |
| ③ | 120       | 10        | 13        | 0            | 9.15      | 13.11     |           |           |                                                                    |
|   | 120       | 10        | 13        | 8            |           |           | 6.29      | 19.09     |                                                                    |
| ④ | 120       | 20        | 13        | 0            | 4.00      | 29.96     |           |           |                                                                    |
|   | 120       | 20        | 13        | 8            |           |           | 3.00      | 39.90     |                                                                    |

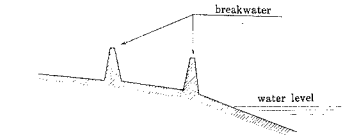


Fig. 17

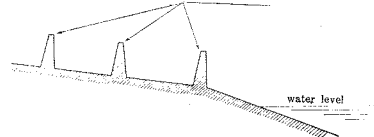


Fig. 18

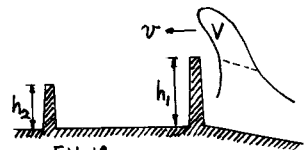


Fig. 19

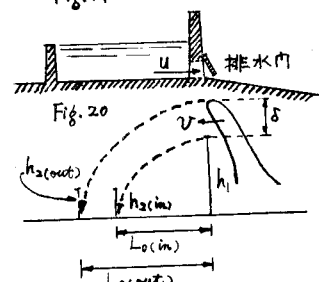


Fig. 20

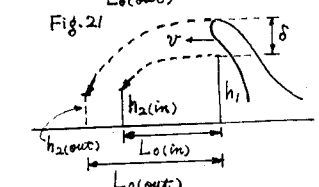


Fig. 21

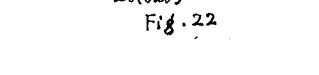


Fig. 22