

# 超低周波音の大気伝搬シミュレーション

小黑 英男\*・藤井 忍\*\*

## Simulation for the Propagation of Low Frequency Noise

By

Hideo OGURO and Shinobu FUJII

### Abstract

Those program were made to simulate the propagation of low frequency noise that had caused a problem of environmental pollution from a tanker at a harbor.

Using this program, the sound pressure level distribution of compound sound was analyzed considering wall position, sound reflection and diffraction.

The following results were obtained throught the analysis and itscom-parision with some actual measurement data.

The sound pressure levels were decreased in shadow zone at long wall, but this effects were almost canceled by the reflection of sound from other walls arrived there.

In case of gradient wall (mountain etc.), where the height of sound source assumed 20m, the reflection dose not influence to the sound pressure level at recieved points excepts those on the wall.

The propagated sound levels can approximatly be calculated by half spherical diffusion theory when the reflection from there walls is small.

The sound pressure levels are almost not influenced by the change of mean absorption coefficient of ground and wall between 0.05 and 0.3.

At the received points over the gradient wall, the propagated sound level increase.

### 目次

1. 緒言	128
2. 伝搬音の音圧レベル	128

2. 1 直接音の到達音圧レベル	128
2. 2 地表面反射音の到達音圧レベル	128
2. 3 受音点背後の反射体からの 到達反射音レベル	128
2. 4 二つの到達音の合成音圧レベル	129
3. 障壁からの反射音が受音点に加わる条件	129
4. 有限長障壁の場合の被反射音領域の条件	130
4. 1 $\beta=90^\circ$ , $\gamma=90^\circ$ の場合	130
4. 2 $\beta \neq 90^\circ$ , $\gamma=90^\circ$ の場合	130

\* 大阪支所

\*\* 装備部

原稿受付：昭和62年3月16日

- 1)  $0^\circ < \beta < 90^\circ$  のとき .....130
- 2)  $-90^\circ < \beta < 0^\circ$  のとき .....131
- 4.3  $\beta = 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$  の場合 .....132
- 4.4  $0^\circ < \beta < 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$  の場合 .....132
- 4.5  $\beta = 0^\circ, \gamma = 90^\circ$  の場合 .....132
- 4.6  $\beta = 0^\circ, \gamma \neq 90^\circ$  の場合 .....132
- 5. 有限長障壁で影となる領域の条件 .....133
  - 5.1  $\beta \neq 90^\circ$  かつ  $\beta \neq 0^\circ$  の場合 .....133
  - 5.2  $\beta = 90^\circ$  の場合 .....133
  - 5.3  $\beta = 0^\circ$  の場合 .....134
  - 5.4  $\gamma \neq 90^\circ$  の場合 .....134
- 6. 障壁からの反射音の一部分が他の障壁の影に入る場合の条件 .....134
- 7. 影の領域に対する回折計算 .....134
- 8. シミュレーション計算と計算結果の検討 .....135
  - 8.1 垂直反射面を持つ複数の障壁の場合 .....135
  - 8.2 障壁が  $x \cdot y$  平面と勾配を持って複数存在する場合 .....137
- 9. 実測データとの比較 .....138
- 10. 結び .....141
- 参考文献 .....141

1. 結 言

数年前の中部地区の某港において、油槽船の揚荷時に用いられるボイラ及びその排気管系からと考えられる周波数約7.5Hzの超低周波音が発生し、周辺の民家に圧力波による公害問題が起きたとの報告があった。

超低周波音（一般に、周波数20Hz以下の聴取不能の圧力伝搬波を指す）は、音の波長が数10mと長く、多くの周波数成分から構成される騒音のような複合音と異なり、特定の単一周波数を持つ純音的要素を有していると思われる。このため、騒音のように大気中の粒子振動によるエネルギー損失のための減衰や気象条件等の自然現象による大巾な減衰は期待出来ず、単に、音のエネルギーの幾何拡散的減衰のみを伴って伝搬し、また、伝搬経路中の一波長以上の大きさを持つ建築物等の反射体からの反射音及び地表面からの反射音と、音源から直接受音点に到達する直接音との位相的干渉による音圧レベルの変動が予想される。

本研究は、これらを全て考慮し、更に、建築物等による音の影の部分への回折現象をも加味して受音点における合成音圧レベルを計算し、設定領域内の超低周波音の伝搬分布状態を検討する目的で実施したものである。

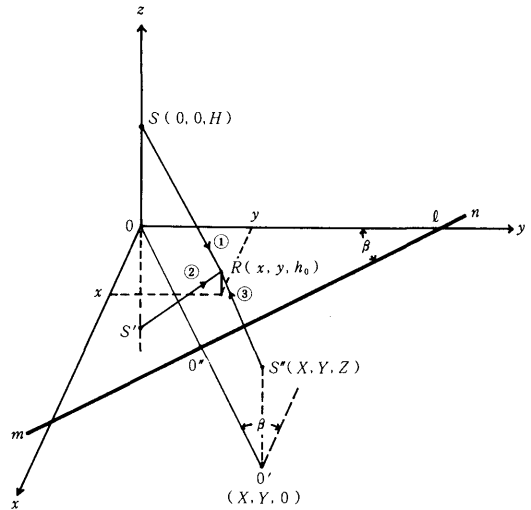


Fig.1  $x \cdot y$  平面に垂直な  $mn$  面からの反射を考慮した受音点  $R$  への音の伝達経路

2. 伝搬音の音圧レベル

Fig.1のように、 $z$  軸上の高さ  $H$  の所に音源  $S$  があり、地面  $h_0$  の高さに受音点  $R$  があるとき、 $S$  から、 $R$  点への伝搬音は、①の直接音と地表面及び受音点後方の障壁等からの反射音②及び③との合成されたものとなる。（但し、2回以上反射した音は省略する）音源を点音源と仮定し、合成音のレベルを計算すると、以下のようになる。

2.1 直接音の到達音圧レベル

音源のパワーレベルを  $PWL$  (dB)、受音点  $R$  における到達音圧レベルを  $SPL_D$  (dB) とすれば、

$$SPL_D = PWL - 10 \log_{10} \{x^2 + y^2 + (H - h_0)^2\} - 11 \dots\dots\dots (1)$$

の式が成り立つ。

2.2 地表面反射音の到達音圧レベル

音源  $S$  の鏡像  $\hat{S}$  を  $z = -H$  の点にとり、 $\hat{S}$  点と  $R$  点を結べば地表面反射音の伝搬経路長となる。到達反射音のレベルを  $SPL_G$  とすれば、

$$SPL_G = PWL - 10 \log_{10} \{x^2 + y^2 + (H + h_0)^2\} - 11 \dots\dots\dots (2)$$

が得られる。

2.3 受音点背後の垂直な反射体からの到達反射音レベル

反射体の  $x \cdot y$  平面上の線またはその延長線が、Fig.

1のようにy軸と源点からの距離*l*, 角度βで交わるとき, Sの鏡像S''の座標 (X, Y, Z) は,

$$\left. \begin{aligned} X &= 2 \cdot l \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta \\ Y &= 2 \cdot l \cdot \sin^2\beta \\ Z &= H \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

となる。従って, 到達反射音のレベルをSPL<sub>w</sub>とすれば,

$$SPL_w = PWL - 10 \log_{10} \{ (X-x)^2 + (Y-y)^2 + (H-h_0)^2 \} - 11 \dots (4)$$

となる。

2.4 2つの到達音の合成音圧レベル

直接音と反射音の合成を両者の位相関係を考慮して計算すると, 合成音の音圧pの絶対値は,

$$|p| = \frac{A}{4\pi r_0} \{ 1 + \left(\frac{r_0}{r_1} \cdot |R|\right)^2 + 2 \cdot \frac{r_0}{r_1} \cdot |P| \cdot \cos k(r_1 - r_0 + \frac{\varphi}{k}) \}^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

となる。(1)

ここで, Aは音の圧力振幅, r<sub>0</sub>, r<sub>1</sub>は直接音と反射音の伝搬経路長, |R|は反射係数の絶対値, k=2・π/λ, λは波長, φは反射点における音線の平面とのなす角である。一般に反射係数Rはエネルギー吸音率をαとしてR=1-αで表わされる。

従って, 両者の合成音レベルは, 直接音に対し,

$$\Delta L = 10 \log_{10} \{ 1 + \left\{ \frac{r_0}{r_1} (1 - \alpha) \right\}^2 + 2 \cdot \frac{r_0}{r_1} (1 - \alpha) \cdot \cos k \left( r_1 - r_0 + \frac{\varphi}{k} \right) \} \dots\dots\dots (6)$$

増加する。ここで, αは反射面の平均吸音率である。

3. 障壁からの反射音が受音点に加わる条件

障壁がx・y平面と角度γの斜面の場合には, Fig.1の鏡像S'はFig.2のS''点へと回転移動する。Fig.2はFig.1のoo'を含む垂直面を示したものである。このときのS''点の座標 (X, Y, Z) は,

$$\begin{aligned} l' &= \{ (l \cdot \sin\beta)^2 + H^2 \}^{1/2} \\ \epsilon &= \tan^{-1} \{ H / (l \cdot \sin\beta) \} \\ \varphi' &= 2r + \epsilon \end{aligned}$$

から,

$$\left. \begin{aligned} X &= (l \cdot \sin\beta - l' \cdot \cos\varphi) \cdot \cos\beta \\ Y &= (l \cdot \sin\beta - l' \cdot \cos\varphi') \cdot \sin\beta \\ Z &= l' \cdot \sin(-\varphi') \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

となる。

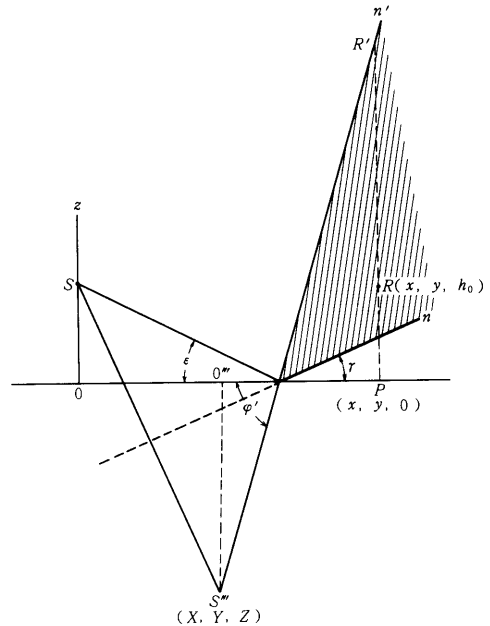


Fig.2 障壁がx・y平面と勾配γで交わるときの鏡像と障壁からの反射が受音点に加わる領域

Fig.2の場合, 受音点Rに斜面o'n'からの反射音に加わるのは, R点がno'n'の領域に存在するときのみであるから, 次の条体式が得られる。

$$\begin{aligned} \{ (x^2 + y^2)^{1/2} - l \cdot \sin\beta \} \tan r < h < \\ \{ (x^2 + y^2)^{1/2} - l \cdot \sin\beta \} \tan\varphi \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned} h &= \{ (x^2 + y^2)^{1/2} - l \cdot \sin\beta \} \\ \tan r + h_0 \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

である。

(8), (9)式の条件は, 受音点がFig.1のoo'を含む鉛直面上にある場合のみ成立する。

受音点が上記以外にある一般的条体式は, Fig.3のように, 点R<sub>0</sub>とFig.2の鏡像S''のx・y平面上への投影点O''とを結ぶ線pq上の障壁のx・y平面上の線mnとの交点Pの座標を求め, 鏡像S''と点Pを結ぶ線のR<sub>0</sub>点における高さ, 受音点Rの高さとの関係から判定されなければならない。

線pqの方程式は,

$$y_{(1)} = \{ (y_0 - Y) / (x_0 - X) \} \cdot x + C \dots\dots\dots (10)$$

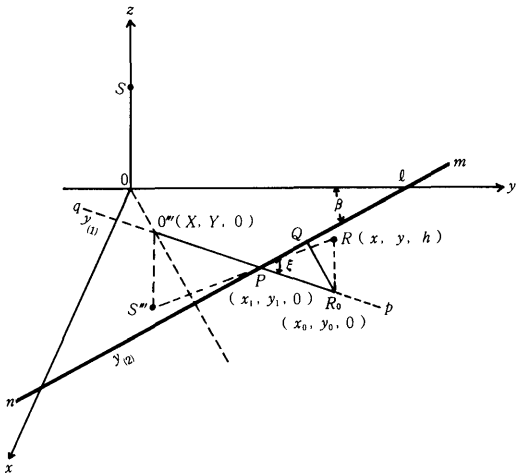


Fig.3 受音点Rが障壁mnに対する鏡像と原点0を含む線の鉛直上にない場合

また、線  $\overline{mn}$  の方程式は

$$y_{(2)} = -\tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \cdot x + l \quad \dots\dots\dots(11)$$

となるから、点Pの座標は  $y_{(1)} = y_{(2)}$  から

$$x_1 = (l - C) / \left\{ \left\{ \frac{y_0 - Y}{x_0 - X} \right\} + \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \right\} \quad \dots\dots\dots(12)$$

となる。ここで、(10)式の定数Cは、変数xと  $y_{(1)}$  にX, Yを代入して

$$C = Y - \left\{ X \cdot \frac{y_0 - Y}{x_0 - X} \right\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

となり、(12)、(13)式から点Pのx座標が求められる。  
 $y_1$ の値は、求めた  $x_1$ の値と(10)または(11)式を用いて求められる。

鏡像  $S''$  と点Pを結ぶ線のx・y平面となす角  $\varphi$  は、点  $O''$  と点Pとの距離aから

$$\varphi = \tan^{-1}(a^2/a) \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 $a = \{(x_1 - X)^2 + (y_1 - Y)^2\}^{1/2}$  である。

点  $S''$  と点Pを結ぶ延長線上の受音点Rの位置における高さは、

$$h_r = \overline{PR_0} \cdot \tan\varphi \quad \dots\dots\dots(15)$$

で求まる。ここで、 $\overline{PR_0}$  は

$$\overline{PR_0} = \{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots(16)$$

であるから、 $h_r$ の値は(14)、(16)式の値を(15)式に代入(130)

すれば求まる。

一方、受音点Rの障壁面への投影点のx・y平面からの高さ  $hw$  は、

$$\begin{aligned} hw &= \overline{QR_0} \cdot \tan r \\ \overline{QR_0} &= \overline{PR_0} \cdot \sin\xi \\ \xi &= \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) - \tan^{-1} \left\{ \frac{y_0 - y_1}{x_0 - x_1} \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(17)$$

の各式と(16)式とから求まる。従って、受音点Rに障壁面からの反射音を加えられる条件式は

$$hw < h < hr \quad \dots\dots\dots(18)$$

となる。ここで、受音点Rのx・y平面からの高さhは、

$$h = hw + h_0 \quad \dots\dots\dots(19)$$

である。

#### 4. 有限長障壁の場合の被反射音領域の条件

条件は、障壁のy軸及びx・y平面とのなす角  $\beta, \gamma$  に伴い、次のように変化する。

##### 4.1 $\beta = 90^\circ, \gamma = 90^\circ$ の場合

Fig.4のように、障壁の両端m, nの座標、鏡像  $S''$  のx・y平面上への投影点を  $O''$  とすれば、 $O''$  とm, nを結ぶ延長線  $\overline{mp}, \overline{nq}$  とに囲まれた領域が反射域となる。従って、条件式は、

(1)  $x_1 > 0, x_2 > 0$  のとき

$$y > y_{(1)}, y < y_{(2)}, y < l \quad \dots\dots\dots(20.1)$$

(2)  $x_1 = 0, x_2 > 0$  のとき

$$x > 0, y < y_{(2)}, y < l \quad \dots\dots\dots(20.2)$$

(3)  $x_1 < 0, x_2 > 0$  のとき

$$y < y_{(1)}, y < y_{(2)}, y < l \quad \dots\dots\dots(20.3)$$

(4)  $x_1 < 0, x_2 = 0$  のとき

$$y < y_{(1)}, x < 0, y < l \quad \dots\dots\dots(20.4)$$

(5)  $x_1 < 0, x_2 < 0$  のとき

$$y < y_{(1)}, y > y_{(2)}, y < l \quad \dots\dots\dots(20.5)$$

##### 4.2 $\beta \neq 90^\circ, \gamma = 90^\circ$ の場合

Fig.5のように、障壁  $\overline{mn}$  がy軸と  $\beta \neq 90^\circ$  のときには、点  $O''$  と障壁の両端m, nを結ぶ線の方程式から、条件式は、 $y_1 > y_2$  のとき、

(1)  $0^\circ < \beta < 90^\circ$  のとき

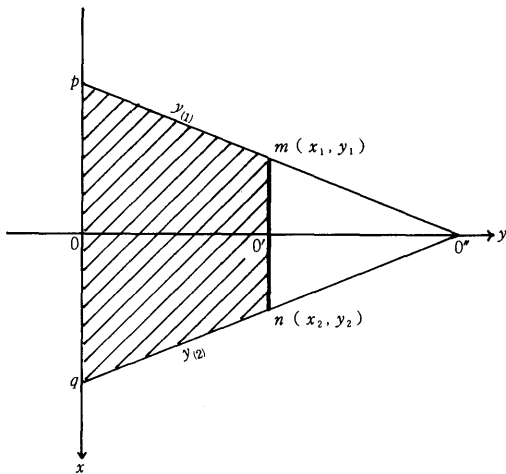


Fig. 4  $\beta=90^\circ, \gamma=90^\circ$ である有限障壁のときの反射音領域 (斜線部分)

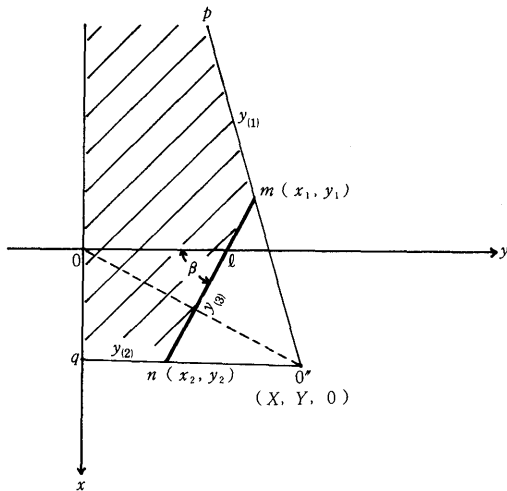


Fig. 5  $\beta \neq 90^\circ, \gamma=90^\circ$ である有限障壁のときの反射音領域 (斜線部分)

- (a)  $y_1 > 0, y_2 > 0, x_1 > x, x_2 > x$ のとき  
 $y > y_{(1)}, y < y_{(2)}, y < y_{(3)} \dots\dots\dots (21.1)$
- (b)  $y_1 > 0, y_2 > 0, x_1 = X, x_2 > X$ のとき  
 $x > X, y < y_{(2)}, y < y_{(3)} \dots\dots\dots (21.2)$
- (c)  $y_1 > 0, y_2 > 0, x_1 < X, x_2 > X$ のとき  
 $y < y_{(1)}, y < y_{(2)}, y < y_{(3)} \dots\dots\dots (21.3)$
- (d)  $y_1 > 0, y_2 > 0, x_1 < X, x_2 = X$ のとき

- $x < X, y < y_{(2)}, y < y_{(3)} \dots\dots\dots (21.4)$
- (e)  $y_1 > 0, y_2 > 0, x_1 < X, x_2 < X$ のとき  
 $y < y_{(1)}, y > y_{(2)}, y < y_{(3)} \dots\dots\dots (21.5)$
- (f) 線  $\overline{mn}$  またはその延長線が原点を通るとき、  
 反射域は存在しない  $\dots\dots\dots (21.6)$
- (g) 線  $\overline{mn}$  またはその延長線がy軸の負側で交わるとき  
 (i)  $x_1 > X$ のとき  
 $y < y_{(1)}, y > y_{(2)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (21.7)$   
 (ii)  $x_1 = X$ のとき  
 $X > X, y > y_{(2)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (21.8)$   
 (iii)  $x_1 < X, x_2 > X$ のとき  
 $y > y_{(1)}, y > y_{(2)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (21.9)$   
 (iv)  $x_2 = X$ のとき  
 $x < X, y > y_{(1)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (21.10)$   
 (v)  $x_2 < X$ のとき  
 $y > y_{(1)}, y < y_{(2)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (21.11)$
- (2)  $-90^\circ < \beta < 0^\circ$ のとき  
 (a)  $y_1 > 0, y_2 > 0, x_2 > X$ のとき  
 $y < y_{(1)}, y > y_{(2)}, y < y_{(3)} \dots\dots\dots (22.1)$   
 (b)  $x_2 = X$ のとき  
 $x > X, y < y_{(1)}, y < y_{(3)} \dots\dots\dots (22.2)$   
 (c)  $x_1 > X, x_2 < X$ のとき  
 $y < y_{(1)}, y < y_{(2)}, y < y_{(3)} \dots\dots\dots (22.3)$   
 (d)  $x_1 = X$ のとき  
 $x < X, y < y_{(2)}, y < y_{(3)} \dots\dots\dots (22.4)$   
 (e)  $x_1 < X$ のとき  
 $y > y_{(1)}, y < y_{(2)}, y < y_{(3)} \dots\dots\dots (22.5)$   
 (f) 線  $\overline{mn}$  またはその延長線が原点を通るとき  
 反射域は存在しない  $\dots\dots\dots (22.6)$   
 (g) 線  $\overline{mn}$  またはその延長線がy軸の負側で交わる

とき

(i)  $x_2 > X$  のとき

$$y > y_{(1)}, y < y_{(2)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (22.7)$$

(ii)  $x_2 = X$  のとき

$$x > X, y > y_{(1)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (22.8)$$

(iii)  $x_1 > X, x_2 < X$  のとき

$$y > y_{(1)}, y > y_{(2)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (22.9)$$

(iv)  $x_1 = X$  のとき

$$x < X, y > y_{(2)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (22.10)$$

(v)  $x_1 < X$  のとき

$$y < y_{(1)}, y > y_{(2)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (22.11)$$

4.3  $\beta = 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$  の場合

Fig.6のように、障壁のx・y平面上の線mnとし、mからp、nからqへとx・y平面と角度 $\gamma$ で高くなるような傾斜面をなす場合、斜面上の受音点に斜面からの反射音に加わる条件は、

$$x_2 > x > x_1 \dots\dots\dots (23)$$

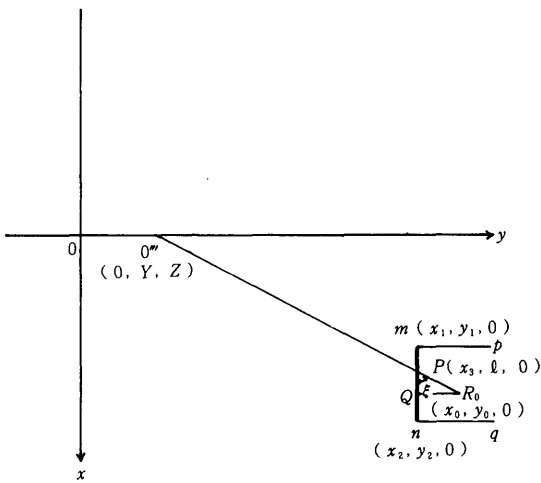


Fig.6  $\beta = 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$  である有限障壁の場合

と3.の(10)~(19)式に $X = 0, y_1 = y_2 = l, \beta = 90^\circ$ を代入して得られた条件が加わったものとなる。但し、(17)式の $\xi$ の値は

(132)

$$\xi = \tan^{-1} \{ (y_0 - l) / (x_0 - x_3) \} \dots\dots\dots (24)$$

に変わり、 $x_1$ は $x_3$ に、 $y_1$ は $l$ として計算する。

4.4  $0^\circ < \beta < 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$  の場合

Fig.7のように、線mnがy軸と角度 $\beta$ で交わり、x・y平面に角度 $\gamma$ の傾斜を持つ斜面上の受音点Rに、斜面からの反射音に加わる条件は、

$$y_{(2)} < y < y_{(1)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots (25)$$

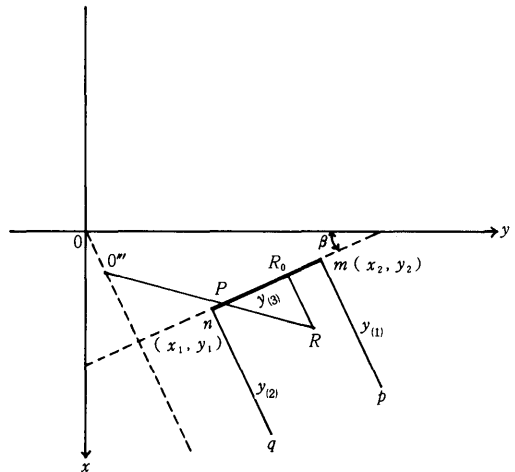


Fig.7  $\beta \neq 90^\circ, \gamma = 90^\circ$  である有限障壁の場合

となり、これに(10)~(19)式の条件が加わったものとなる。

4.5  $\beta = 0^\circ, \gamma = 90^\circ$  の場合

Fig.8のようにy軸に平行な障壁のときは、4.2の場合の特異状態となり、反射域の条件は、

$$x_1 > 0 \text{ のとき } y_{(2)} < y < y_{(1)}, x < x_1 \dots\dots\dots (26.1)$$

$$x_1 < 0 \text{ のとき } y_{(2)} < y < y_{(1)}, x > x_1 \dots\dots\dots (26.2)$$

となる。

4.6  $\beta = 0^\circ, \gamma \neq 90^\circ$  の場合

この場合は4.4の特異状態となり、反射音に加わる条件は、

$$\left. \begin{array}{l} x_1 > 0 \text{ のとき } y_{(2)} < y < y_{(1)}, x > x_1 \\ x_1 < 0 \text{ のとき } y_{(2)} < y < y_{(1)}, x < x_1 \end{array} \right\} \dots\dots (27)$$

と(10)~(19)式の条件とからなる。

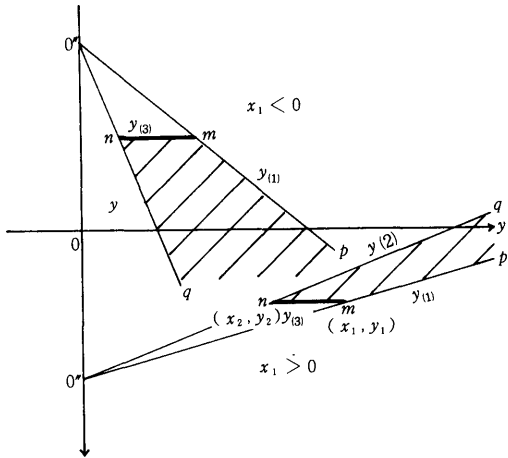


Fig.8  $\beta = 0^\circ, \gamma = 90^\circ$ である有限障壁のときの反射音領域 (斜線部分)

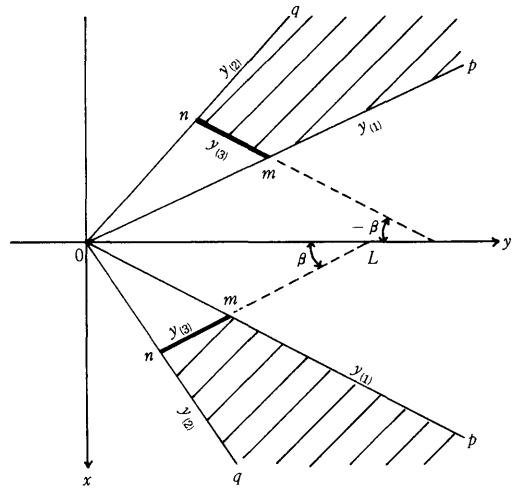


Fig.9 伝搬音が障壁によって遮ぎられる影の領域 (斜線部分)

5. 有限長障壁で影となる領域の条件

障壁が有限長で $\gamma = 90^\circ$ の場合には、直接音が障壁によって遮られ、音の影の領域が生じる。この影の領域に受信点が存在するときには後述の回折計算をする必要がある。ここでは、影の領域の条件のみを考察する。

5.1  $\beta \neq 90^\circ$ でかつ $\beta \neq 0^\circ$ の場合

Fig.9のpmnqで囲まれる領域が影となる。このときの条件は、

$$\beta \neq 0 \text{ のとき } y_{(2)} < y < y_{(1)}, y > y_{(3)} \dots\dots\dots(28.1)$$

となる。

障壁の位置がFig.10のように変化すると、 $\beta < 90^\circ$ のとき

(a)のとき $y > y_{(1)}, y > y_{(2)}, y > y_{(3)}$	} \dots\dots\dots(28.2)
(b)のとき $y_{(1)} < y < y_{(2)}, y > y_{(3)}$	
(c)のとき 影を持たない	
(d)のとき $y_{(2)} < y < y_{(1)}, y < y_{(3)}$	

また、Fig.11のように $-90^\circ < \beta < 0$ のときには、

(a)のとき $y_{(2)} < y < y_{(1)}, y < y_{(3)}$	} \dots\dots\dots(28.3)
(b)のとき 影を持たない	
(c)のとき $y_{(1)} < y < y_{(2)}, y > y_{(3)}$	
(d)のとき $y > y_{(1)}, y > y_{(2)}, y > y_{(3)}$	
(e)のとき $y_{(2)} < y < y_{(1)}, y > y_{(3)}$	

が条件となる。

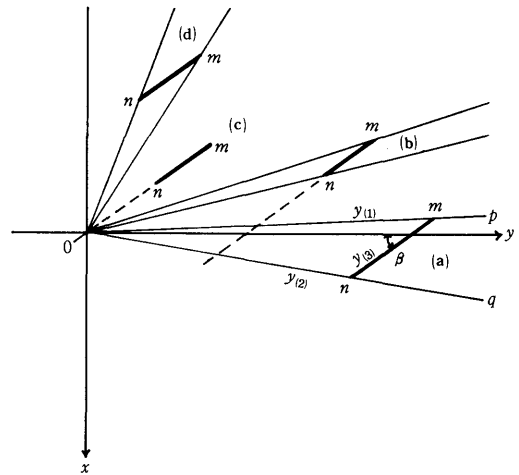


Fig.10 障壁の存在位置による条件の変化 ( $\beta < 90^\circ$ )

5.2  $\beta = 90^\circ$ の場合

Fig.12の場合には、影の条件は

(a) $x_1 > 0$ のとき $y_{(2)} < y < y_{(1)}, y > l$	} \dots\dots\dots(29)
(b) $x_1 = 0$ のとき $y > y_{(2)}, x > 0, y > l$	
(c) $x_1 < 0, x_2 > 0$ のとき $y > y_{(1)}, y > y_{(2)}, y > l$	
(d) $x_1 < 0, x_2 = 0$ のとき $y > y_{(1)}, x < 0, y > l$	
(e) $x_2 < 0$ のとき $y_{(1)} < y < y_{(2)}, y > l$	

となる。

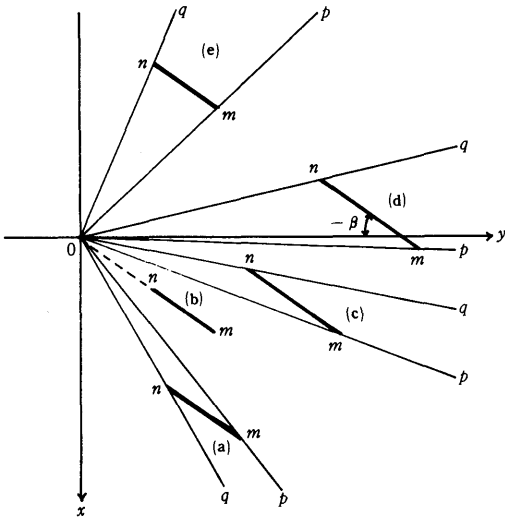


Fig. 11 障壁の存在位置による条件の変化 ( $\beta < 0^\circ$ )

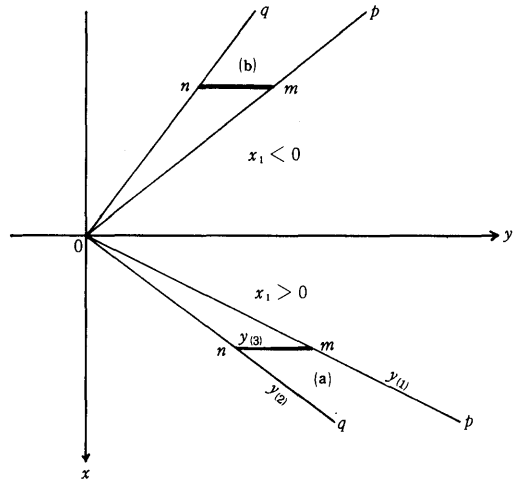


Fig. 13 障壁の存在位置による条件の変化 ( $\beta = 0^\circ$ )

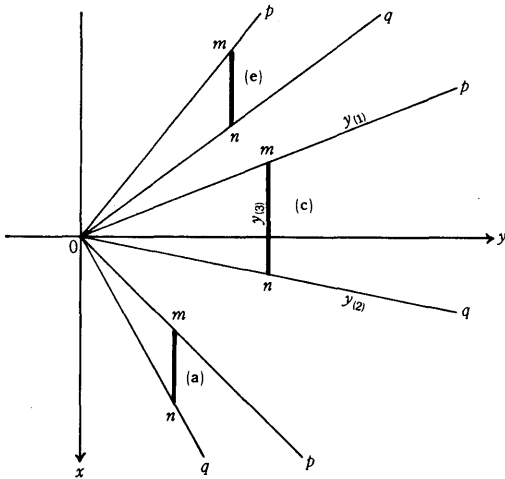


Fig. 12 障壁の存在位置による条件の変化 ( $\beta = 90^\circ$ )

5.3  $\beta = 0^\circ$  の場合

このときの影の条件は,

$$\left. \begin{aligned} (a) & x_1 > 0 \text{ のとき } y_{(2)} < y < y_{(1)}, x > x_1 \\ (b) & x_1 < 0 \text{ のとき } y_{(2)} < y < y_{(1)}, x < x_1 \end{aligned} \right\} \dots (30)$$

となる。

5.4  $\gamma \neq 90^\circ$  の場合

この場合は、反射面が  $x \cdot y$  平面上の一体構造体と仮

(134)

定 (山等のように) すると、影の部分はなくなる。

6. 障壁からの反射音の一部分が他の障壁の影に入る場合の条件

複数の障壁があるときには、反射音が他壁の影の領域に加えられることがある。 $\gamma = 90^\circ$  の場合のこのようなケースを Fig. 14 に示す。(a) では障壁②の反射音が障壁①の影の S+R の領域に、(b) では障壁④の反射音が障壁③の影の S+R の領域に加わる。従って、これらの領域では回折音  $S_i$  と反射音  $R_{i+1}$  のレベルの合成計算が必要となる。そのため、反射音の入り込む領域か否かの判定を行う要があるが、障壁の配置により、条件は多岐に亘るため省略する。但し、シミュレーションのプログラムには全ての場合の条件を加えている。

7. 影の領域に対する回折計算

文献〔1〕の厚さのある障壁に対する近似計算法を採用して、障壁の両端から影の部分への回折する音圧レベルを計算すると、

$$Ldif = PWL - 20 \log_{10} Dd - 11 - \Delta L \dots (31)$$

となる。ここで、 $\Delta L$  は回折による減衰量で、実験結果により

$$\Delta L = 10 \log_{10} N + 13 \dots (32)$$

となることが知られている。(32) 式の  $N$  は Fresnel Number (フレネル数) といい、音の波長  $\lambda$  と Fig. 15 に



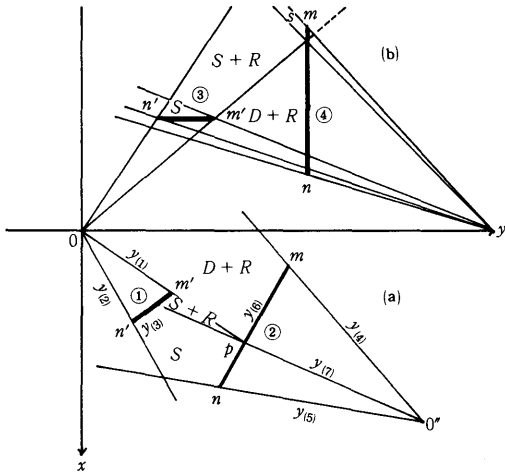


Fig. 14 白障壁の音の影の領域に他障壁の反射音が入る場合

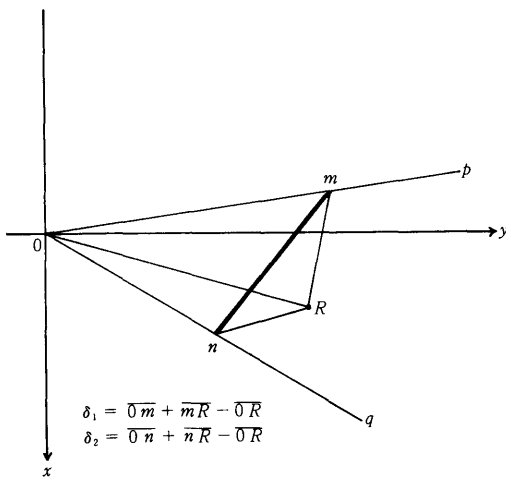


Fig. 15 障壁の両側面からの回折音計算に用いる経路長差

示す伝搬経路長の差 $\delta$ から

$$N = 2 \cdot \delta / \lambda \dots \dots \dots (33)$$

として求める。

両端からの回折を考え、 $\delta_1$ 及び $\delta_2$ から(31)~(33)を用いて計算し、パワー合成して近似計算をした。

8. シミュレーション計算と計算結果の検討

当支所にある電子計算機Sony T.ektronix4052を用いてのフローをFig.16, 17に示す。

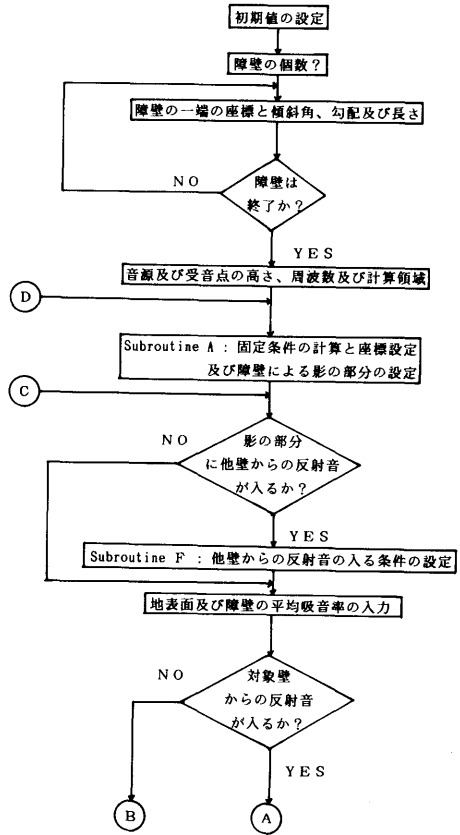


Fig.16 計算フロー

8.1 垂直反射面を持つ複数の障壁の場合

y軸と60°の角度で交差する高さ無限大で長さ400mの一つの障壁がある場合の、音源の高さ20m、周波数7.5Hz、地表面及び壁面の平均吸音率をそれぞれ0.2と仮定したときの、x軸、y軸方向各2000mの範囲内の合計1008点(21×48点)の受音点(高さ1.2m)における音圧レベルの分布状態を三次元的に表示したものをFig.18(1)に示す。また、x軸の値を固定したときのy軸方向の音圧レベルの分布状態をFig.18(2)に示す。Fig.18(2)から、y=1mのときの最大音圧レベル(x軸-25mのとき)は、111dBで、PWLに対し39dB減少しているのがわかる。この曲線(●印は、y=1000m点

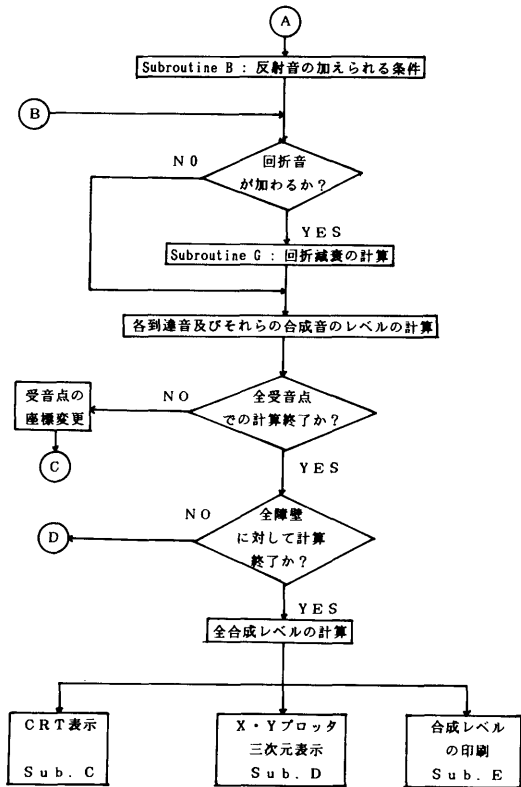


Fig.17 計算フロー

で大きく減衰しているが、これは、障壁の影に受音点が入ったためである。この現象は、Fig.18(1)では、大きく窪んだ形で現われている。障壁による反射の影響は、Fig.18(1)の+x軸方向に現われているが、直接音の方レベルが大きいため、音圧レベルの変化は影の部分に比し小さい。音源からの水平距離がx, y方向共100 m毎の各点の音圧レベルの分布状態をFig.18(3)に示す。図中の半円は半球拡散として計算した75~110dBの5 dB毎の曲線である。

影の部分(S)では最大13dB小さなレベルとなっている。

障壁が2つ存在する場合の分布図をFig.19に示す。障壁が3つの場合をFig.20に、更に、障壁が増えて4つとなった場合をFig.21に示す。各障壁の平面的配置図と反射域、影領域の関係をFig.22に示す。障壁の数が増す程三次元分布図は複雑となるが、y軸方向の分布曲線に局部的な大きな窪みがなくなり、比較的滑らかな形に変化する。

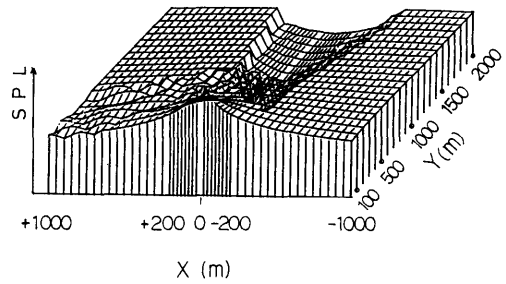


Fig.18(1) 一つの障壁による反射と影( $\beta=60^\circ$ , 周波数 7.5Hz)

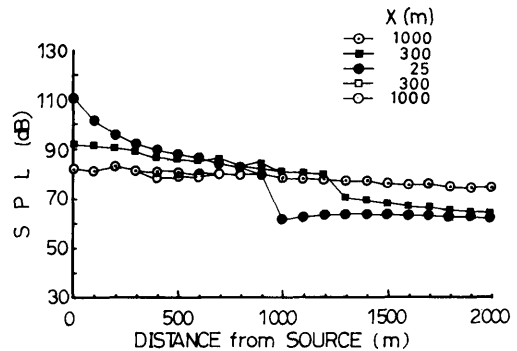


Fig.18(2) x軸の値を固定したときのY軸方向の音圧レベル分布曲線 ( $\beta=60^\circ$ )

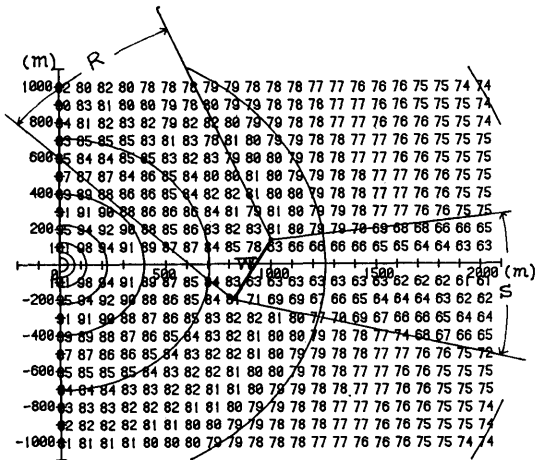


Fig.18(3) 各受音点における音圧レベル (R: 反射域 S: 影の領域)

Fig.22において、障壁②の一部分は障壁①の影に入っているため、 $R_2$ の領域のみが障壁②の反射音に加わり、障

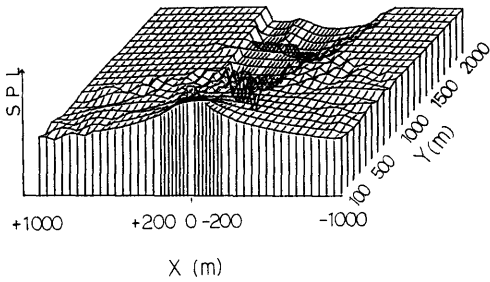


Fig.19  $\beta = \pm 60^\circ$ の2つの障壁のとき (周波数7.5Hz)

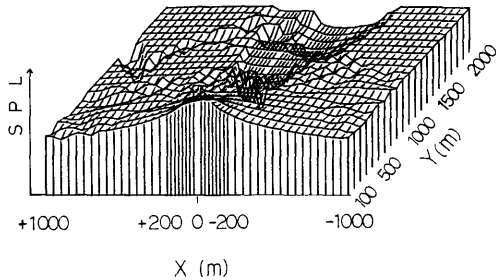


Fig.20  $\beta = \pm 60^\circ$ と $\beta = 0^\circ$ の3つの障壁のとき (周波数7.5Hz)

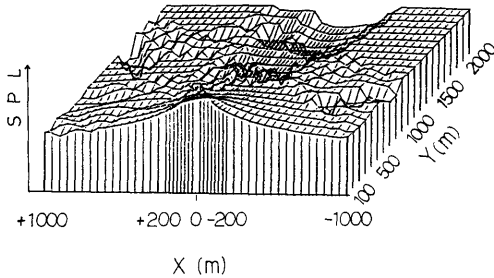


Fig.21  $\beta = \pm 60^\circ$ と $\beta = 0^\circ$ 2つの合計4つの障壁のとき (周波数7.5Hz)

壁④の反射音は障壁①で一部分が遮ぎられ、2条の $R_4$ を形成する。また、障壁①、②、④の影の領域には、他の障壁からの反射音に加わり、部分的に音圧レベルが上昇する。

8.2 障壁がx・y平面と勾配を持って複数存在する場合

8.1と同様、音源の高さ20m、受音点の高さ1.2mで障壁がx・y平面と $20^\circ$ の勾配を持つ場合(山等のとき)の合計1860点(31×60点)における音圧レベルの分布状態の三次元的表示例をFig.23(1)に示す。この図の

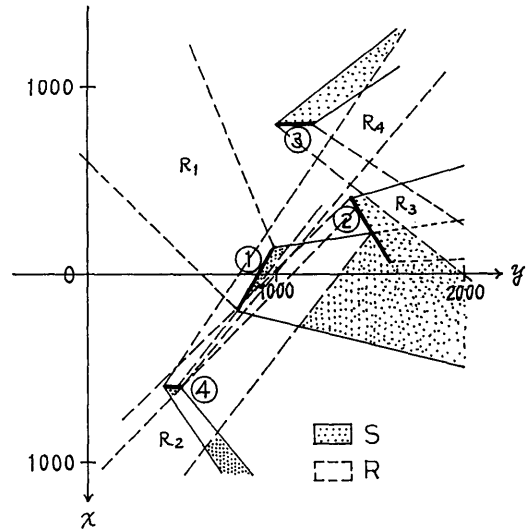


Fig.22 4つの障壁による音の影と反射音の領域

場合の周波数は100Hzであるが、周波数が50HzのときはFig.23(2)のように障壁上の干涉的音圧レベルの変化は一山となり、周波数20Hz以下ではFig.23(3)のように干涉的变化は殆んど見られなくなる。この結果は、超低周波音の領域では、ほぼ伝搬距離に比例して音圧レベルの減衰が大きくなり、特定の場所で異常に音圧レベルが上昇するようなことはないといえよう。

今迄の計算は、地表面及び障壁面の平均吸音率を何れも0.2としたときのものであるが、これらを変化させたときのx軸上20mのy軸距離1~1,500mの間の音圧レベルの比較曲線をFig.24及びFig.25に示す。

障壁面の平均吸音率を0.2と仮定し、地表面の平均吸音率を0.05, 0.1, 0.2及び0.3に変化させても、Fig.24のようにほぼ一本の曲線となり(但し、周波数は7.5Hz)、超低周波音の場合、地表面の吸音効果は見られない。この現象は、地表面の平均吸音率を0.2に固定し、障壁面の平均吸音率を0.1, 0.2, 0.3と変化させたFig.25のレベルの大きい方の曲線(3本が一つになっている)でも同様となった。地表面及び障壁面の平均吸音率を0.8と0.95と仮定すると、分布曲線はFig.25のレベルの小さい方の線で合体した。この曲線は、大きい方の曲線より約2dB低いレベルで画かれた。Fig.24, 25で、距離1,050m以上で若干レベルが大きくなっているのは、y軸距離1,000mでy軸と $90^\circ$ で交わる勾配 $10^\circ$ の斜面を入れて計算しているためである。距離1,000mまで

の音圧レベルは、ほぼ半球面拡散減衰として地表面からの反射波を考慮せずに計算した曲線に等しくなる。

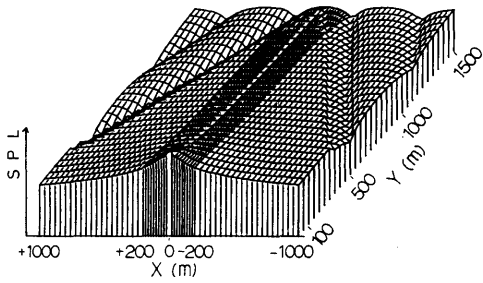


Fig.23(1) 勾配20°の2つの障壁のとき ( $\beta = \pm 40^\circ$ , 周波数100Hz)

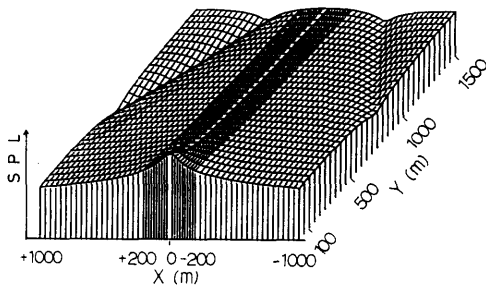


Fig.23(2) 勾配20°の2つの障壁のとき ( $\beta = \pm 40^\circ$ , 周波数50Hz)

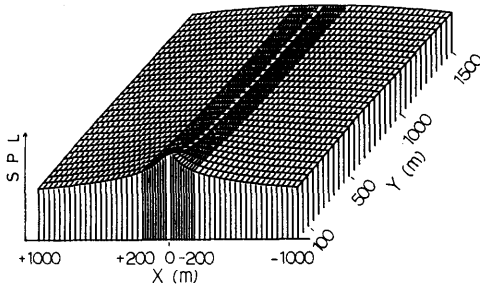


Fig.23(3) 勾配20°の2つの障壁のとき ( $\beta = \pm 40^\circ$ , 周波数20Hz)

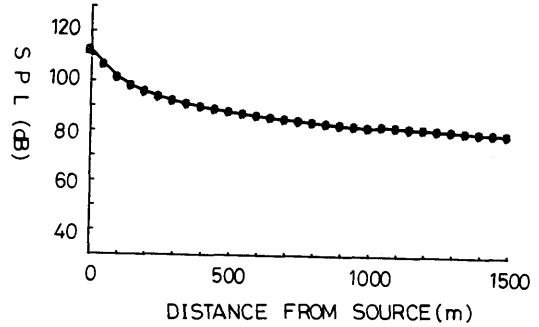


Fig.24 地表面の平均吸音率を変化させたときの比較曲線

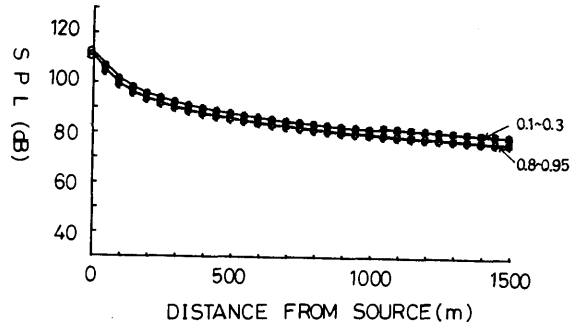


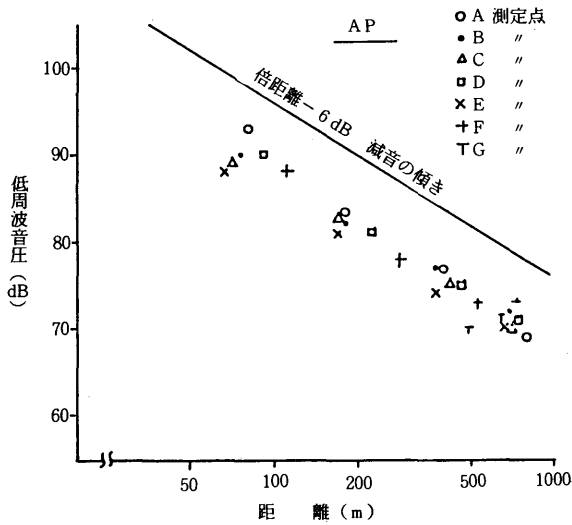
Fig.25 地表面の平均吸音率を変化させたときの比較曲線

### 9. 実測データとの比較

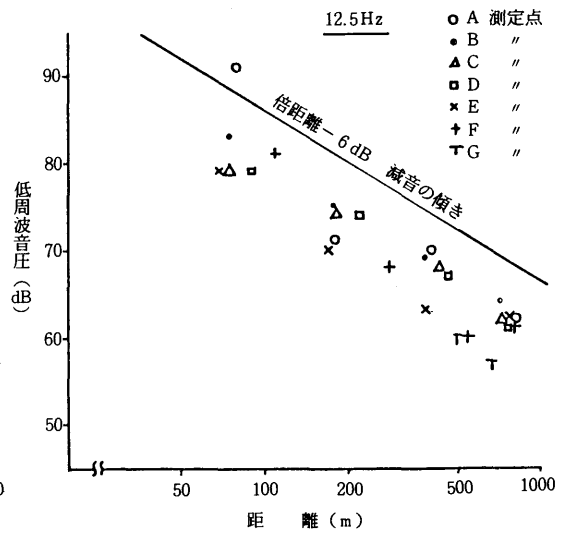
Fig.26は某地<sup>(2)</sup>における超低周波音の実測データで、(a)は測定点、(b)は全周波数域 (Over All) 音圧レベル、(c)は12.5Hzの1オクターブバンドフィルター使用時の音圧レベルを測定点の音源からの距離に対して整理したものである。測定点の方向により同一距離における音圧レベルに最大8 dB程度のレベル差が見られるが、総体的には、ほぼ伝搬距離が2倍となる毎に6 dB減衰する二乗則に合致している。この傾向は、音源の全周波数域のレベルのみならず、主成分となるバンドレベルにおいても同様である。方向によるレベル差は、主として風向に起因するものと考えられる。測定当日の風向はSSW、風速1.4m/secと記されている。この方向はFig.26(a)のE方向に相当する。従って、E、F、Gの各方向は音源に対し風上側に当るため、異常減衰を生じたと判断出来る。



(a) 測定点

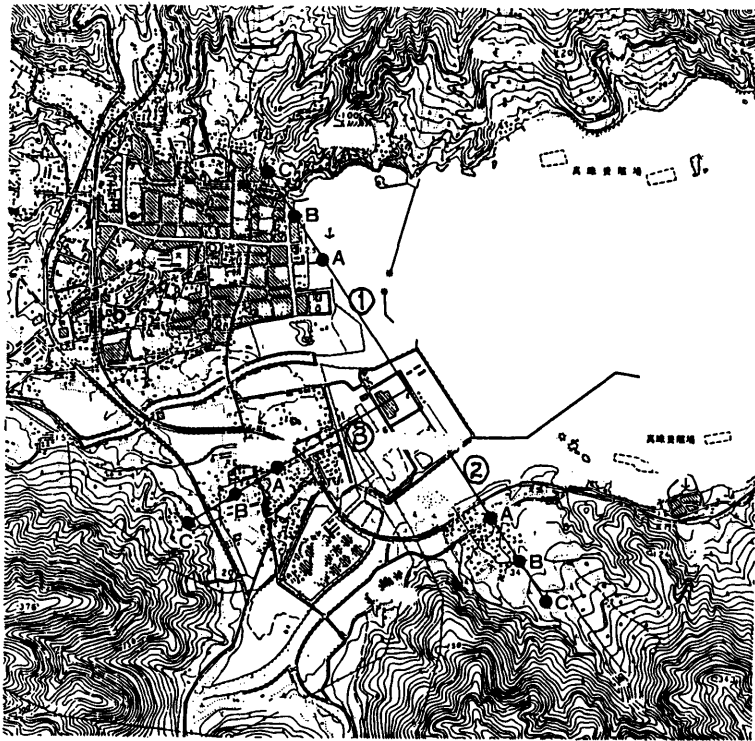


(b) 全周波数域

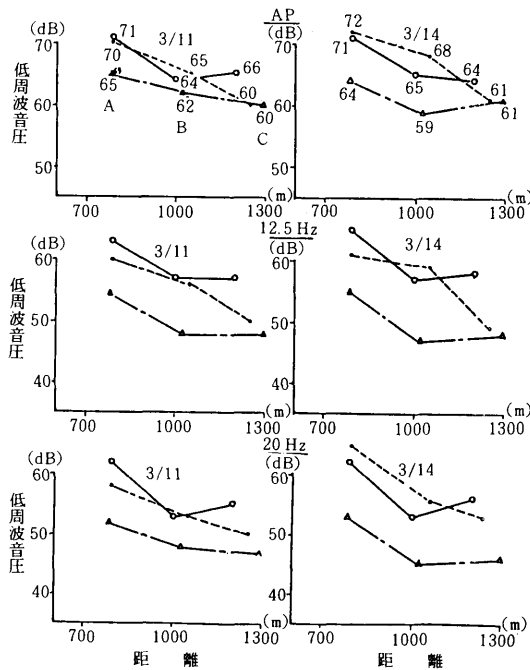


(c) 12.5 Hz オクターブバンド

Fig.26 某地における実測データ(1)



(a) 測定点



(b) 伝搬距離に対する音圧レベル

Fig.27 某地における実測データ(2)

Fig.27もFig.26と同地において測定した結果である。当日の風向は③の方向で③の各測定点は音源に対し風上方向に当るため異常減衰を生じている。異常減衰レベルは、風速が大きい3/14の測定時に大きく、Over Allの値で約8 dBとなっている。②と③の方向の1,000m以上の距離の測定点における音圧レベルが殆んど減衰しないが、逆に増大している現象は、地形図から見て、それらの測定点が斜面上の高台に位置していたためと判断出来る。

Fig.26, 27の実測データに近似するよう、音源のパワーレベルを測定点の音圧レベルから推定してシミュレーション計算を行ったのがFig.28である。この計算は3方向に斜面(y軸に対し0°, 90°, 30°, 勾配20°, 平均吸音率0.2)を与えて求めたもので、図中の半楕円状の曲線は65~95dBの5 dB毎の二乗則計算による等レベル曲線である。また、レベル値を円で囲んだ所は、ほぼFig.27の測定点に該当する所で、計算値と実測値との差は風上方向(Y軸上)を除き殆んどなく、風上方向でも4 dB程度である。

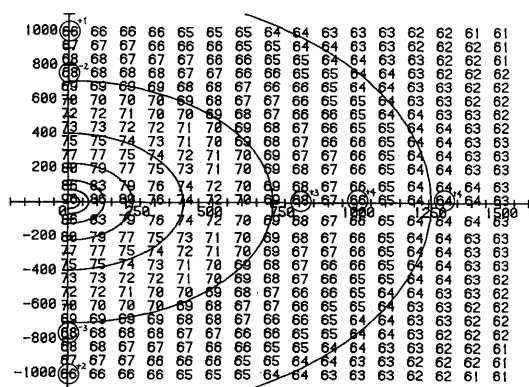


Fig.28 シミュレーション計算レベル分布図 (周波数 12.5Hz, PWL=135dB)

## 10. 結 び

超低周波音に関する研究は、公害問題に端を発し開始されたもので、本研究もその中の一つの課題として行ったものである。一般に、主成分が単一周波数に近い超低周波音の場合でも、障壁の位置や大きさ等により音の分布状態に乱れが生ずることが考えられるから、シミュレーション計算により予め分布状態を予測し、場合によっては、必要な防音対策を検討しておくべき

である。本シミュレーションプログラムは、二つの音の位相を考慮した合成レベルを計算するもので、更に多くの合成にはパワー合成で処理しているため、多数の反射音等が加わる位置に受音点がある場合は近似値しか得られない。また、障壁の両端が山等のように斜めになっている場合には、若干の訂正を必要とする。

実測例が比較的少ないため、更に実測を行って予測計算の検証を必要としようが、予測計算の値が数例に対しては数dBの誤差範囲に入っている。風の影響は若干見られるが、その補正は音源から見て風上方向の受音点に対してのみ数dB小さくすることでよいようである。

シミュレーション計算により見出された主な結果を列挙すると次のようになる。

- (1) 大きな障壁がある場合には音の影が生じ、音圧レベルの大きな減衰があるが、他の障壁からの反射音はその領域に入ると減衰が殆んどなくなる。
- (2) 音源の高さが20m程度の場合には、勾配を持つ障壁(山等のような)からの反射音はその斜面上に受音点がある場合のみが加味される。従って、他の位置にある受音点の音圧レベルの計算は、音源から倍距離6 dB減の二乗則による幾何拡散(半球面拡散)減衰のみによって求められる。
- (3) 地表面及び障壁の平均吸音率が0.05から0.3に変化しても計算値に殆んど変化が生じない。
- (4) 音源が船の煙突の外被のように大きくても、受音点の距離がその数10倍あれば、実測値との比較検討の結果から、点音源として計算してよい。
- (5) 風上側に受音点がある場合には、計算値から数dB減じた値を採用してよい。
- (6) 山等の斜面上の受音点では、幾何拡散減衰計算値より数dB大きくなり、音源からの距離をベースとした音圧レベルの減衰曲線に不連続部分を生じる。

終りに、計算機使用に際し協力を頂いた大阪支所職員各位に感謝の意を表する。

## 参考文献

- (1) 騒音対策ハンドブック 技報堂
- (2) 低周波空気振動にかかる調査報告書：昭和54年9月及び昭和57年2月