



昭和56年 10月 5日

日本コロムビア(株)

米山 正秀

於 阪大産研

空気中でのパラメトリック現象の
スピーカへの応用

1) 変調波ビームのパラメトリック現象

超音波振動子アレイに、次式のごとき被変調波信号を加える。

$$V = V_0 \cdot f(t) \cdot \cos \omega_1 t \quad (1)$$

ここで $\left\{ \begin{array}{l} f(t) : \text{エンベロープ成分} \\ \omega_1 : \text{超音波角周波数} \end{array} \right.$

この場合、振動子からは式(2)のごとき音圧を有する超音波ビームが発生するとする。

$$P' = P_1 \cdot f\left(t - \frac{r}{c_0}\right) \cdot e^{-\alpha_1 r} \cdot \cos(\omega_1 t - k_1 r) \quad (2)$$

ここで $\left\{ \begin{array}{l} P_1 : \text{キャリアビームの音圧} \\ c_0 : \text{音速} \\ \alpha_1 : \text{キャリア超音波の減衰定数} \\ k_1 : = \omega_1 / c_0 \end{array} \right.$

この場合、空気の非線形効果によりエンベロープ成分が検波されて発生するが、この音圧はアレイの正面軸上 r (m) の点では次式のごとくなる。

$$P = \frac{\beta P_1^2 a^2}{16 \rho_0 c_0^4 \alpha_1 r} \frac{\partial^2}{\partial t^2} f^2\left(t - \frac{r}{c_0}\right) \quad (3)$$

2) 振幅変調波の場合

今、信号 $g(t)$ で振幅変調することを考えると、この時のエンベロープは次式となる。

$$f(t) = 1 + m \cdot g(t), \quad m < 1 \quad (4)$$

したがって

$$f^2\left(t - \frac{r}{c_0}\right) = 1 + 2m \cdot g\left(t - \frac{r}{c_0}\right) + m^2 g^2\left(t - \frac{r}{c_0}\right) \quad (5)$$

ここにおいて、 $m \ll 1$ と仮定すると式(5)右辺の第3項は無視できるので式(3)、(4)より

$$p = \gamma \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} g\left(t - \frac{r}{c_0}\right) \quad (6)$$

$$\text{ただし } \frac{2m\beta P_i a^2}{16\rho_0 c_0^4 \alpha, r} \equiv \gamma$$

3) イコライザーによる補正

今、それぞれ次のごとき Fourier 変換対を定める。

$$g\left(t - \frac{r}{c_0}\right) \longleftrightarrow G(\omega) \quad (7)$$

$$p(t) \longleftrightarrow P(\omega)$$

式(6)の両辺を Fourier 変換すると

$$P(\omega) = -\gamma \omega^2 G(\omega) \quad (8)$$

したがって、可聴信号を振幅変調する以前に -12dB/oct のフィルターに通す。(図1参照)

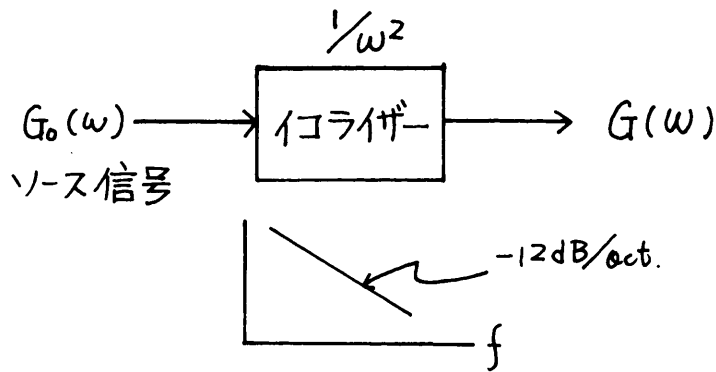


図 1

この時、ソース信号 $G_0(\omega)$ とイコライザ出力信号 $G(\omega)$ の関係は

$$G(\omega) = \frac{1}{\omega^2} G_0(\omega) \quad (9)$$

したがって 式(8)、(9)より

$$P(\omega) = -\gamma G_0(\omega)$$

または

$$P(t) = -\gamma \cdot g_0\left(t - \frac{r}{c_0}\right)$$

(10)

式(10)から明らかのごとく、ソース信号に比例した音圧を得ることができる。
全体のブロック図を描くと図2のごとくなる。

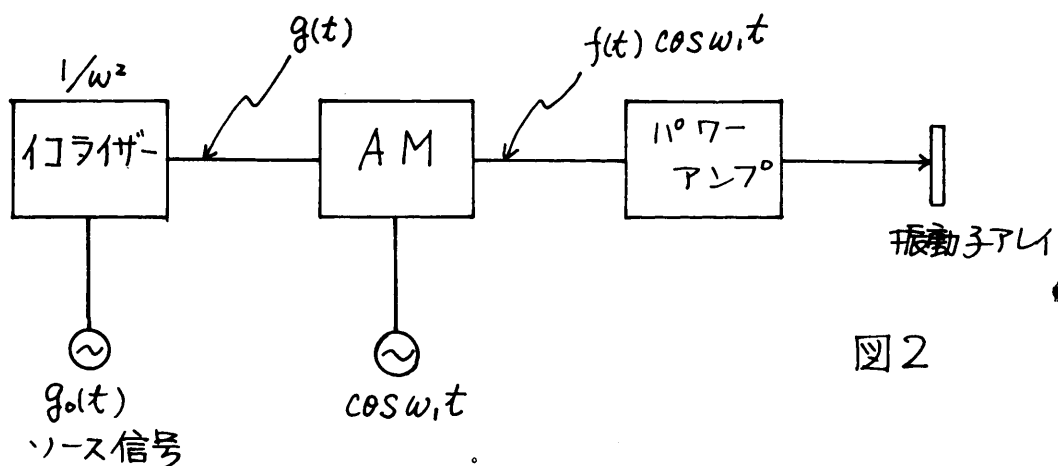


図 2

4) 音圧レベルの数値計算

ソース信号が正弦波の時の音圧を求める。

$q(t) = \cos \omega_s t$ とするとこの成分の音圧は

$$p = \gamma \omega_s^2 = \frac{\beta P_i^2 a^2 m}{8 \rho_0 c_0^4 \alpha_1 r} \omega_s^2$$

各パラメータは次の値をとるものとする。

$$\beta = 1.2$$

$$\rho_0 = 1.2 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$c_0 = 340 \text{ (m/sec)}$$

$$\alpha_1 = 0.19 \text{ (neper/m)}$$

$$\omega_s / 2\pi = 1000 \text{ Hz}$$

$$a = 0.05 \text{ (m)}$$

$$P_i = 20 \text{ (N/m}^2\text{)} \\ \text{(120 dB SPL)}$$

$$r = 1 \text{ (m)}$$

音圧を計算すると

(1) $m = 1$ のとき

$$p = 2 \times 10^{-3} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (= 40 \text{ dB SPL)}$$

(2) $m = 0.5$ のとき

$$p = 1 \times 10^{-3} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (= 34 \text{ dB SPL)}$$

(3) $m = 0.1$ のとき

$$p = 2 \times 10^{-4} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (= 20 \text{ dB SPL)}$$

P_i と m をパラメータとして音圧を計算すると。

| $P_i \backslash P$ | 120dB | 130 | 140 | 150 | 160 |
|--------------------|-------|-----|-----|-----|-----|
| $m = 1$ | 40dB | 60 | 80 | 100 | 120 |
| $m = 0.5$ | 34dB | 54 | 74 | 94 | 114 |
| $m = 0.1$ | 20dB | 40 | 60 | 80 | 100 |

5) ひずみ率の計算

ソース信号を正弦波とした時のひずみ率を求める。

$$g(t) = \cos \omega_s t$$

とすると、式(5)より、

$$\begin{cases} \text{信号成分: } 2m g(t) = 2m \cos \omega_s t \\ \text{ひずみ成分: } m^2 g^2(t) = m^2 \cos^2 \omega_s t \\ \qquad \qquad \qquad = \frac{1}{2} m^2 + \frac{1}{2} m^2 \cos 2\omega_s t \end{cases}$$

したがって、第2高調波ひずみ率 ε は、

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{2} m^2}{2m} \times 100\% = \frac{m}{4} \times 100\% \quad (11)$$

| | | | |
|---------------|-----|-------|------|
| m | 1.0 | 0.5 | 0.1 |
| ε | 25% | 12.5% | 2.5% |

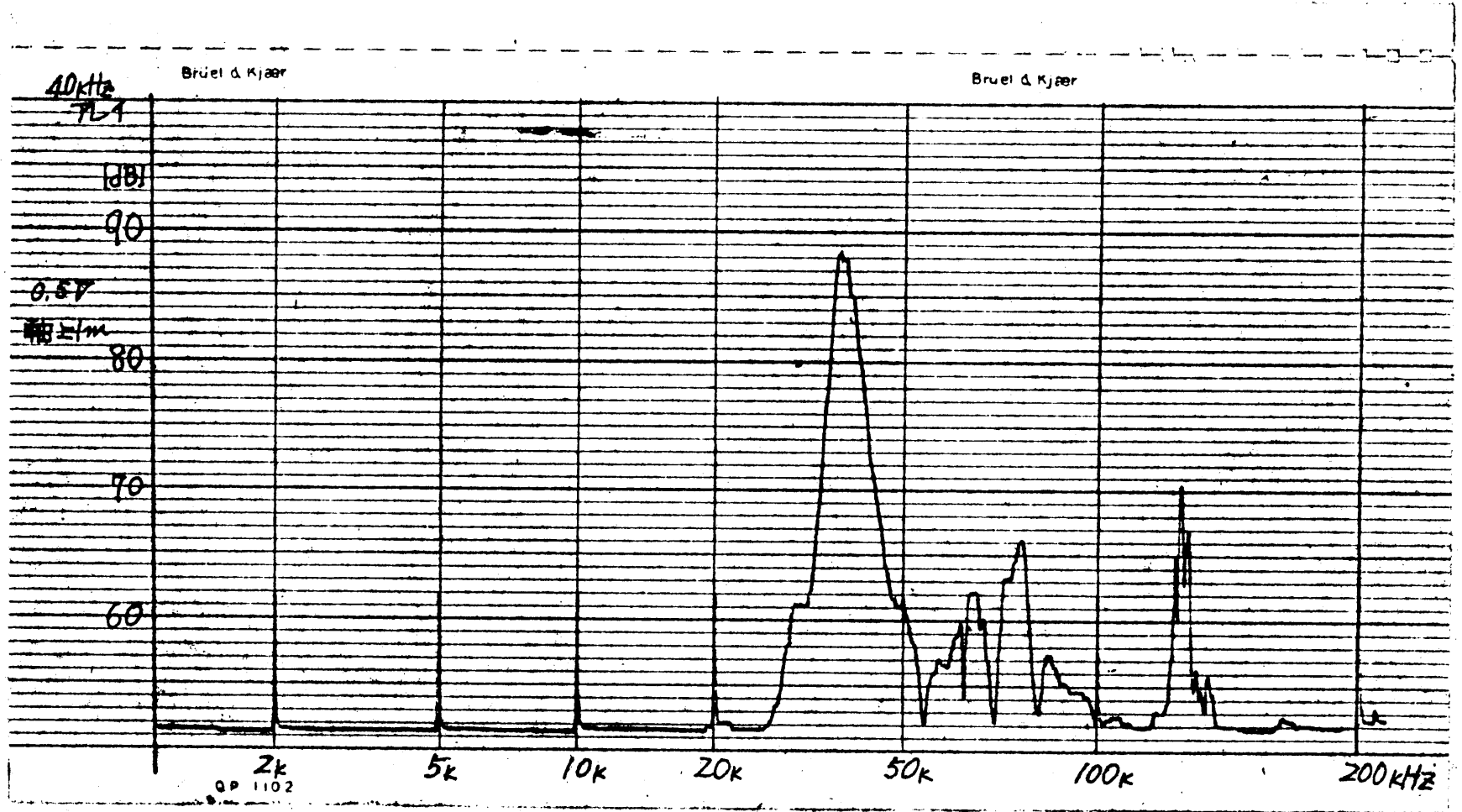


図1 超音波振動子AL1の周波数特性

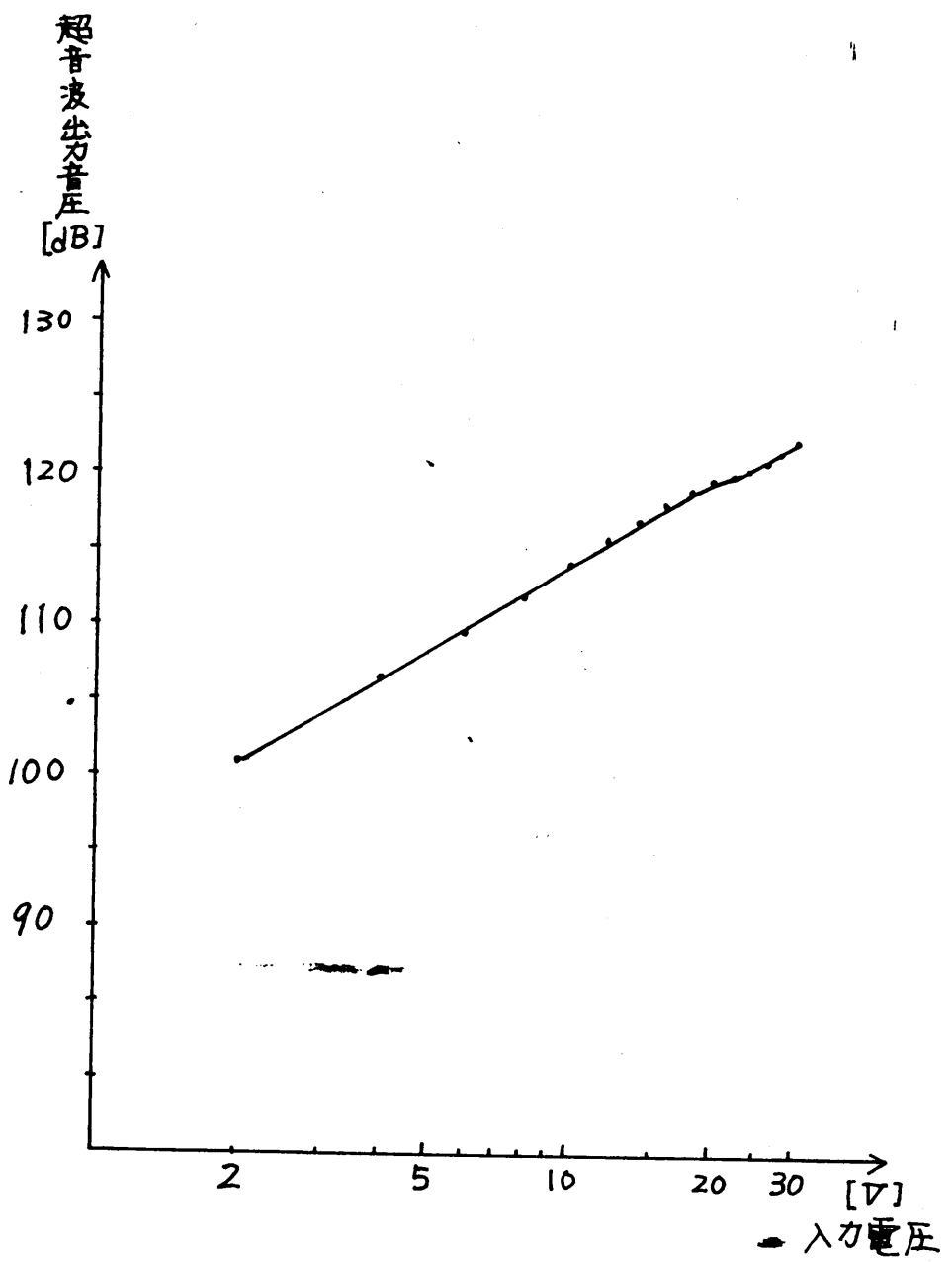
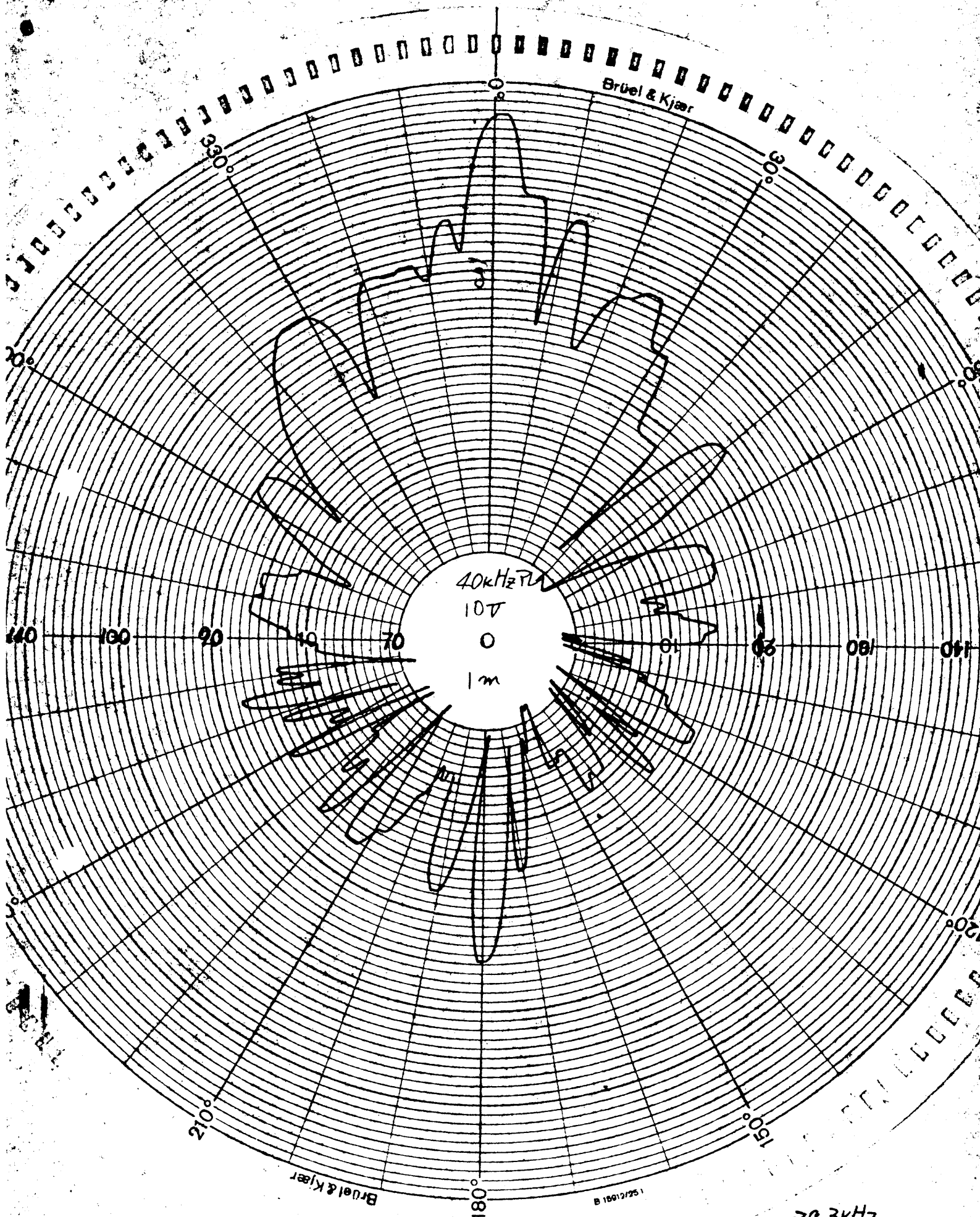


図2 超音波振動子アレーの入力電圧に対する出力音圧特性 (周波数39.3kHz)



39.3kHz
 Δ01
 軸上1m

図3超音波振動子アレイの指向特性

正面

側面

図4 振動子アレイ外觀

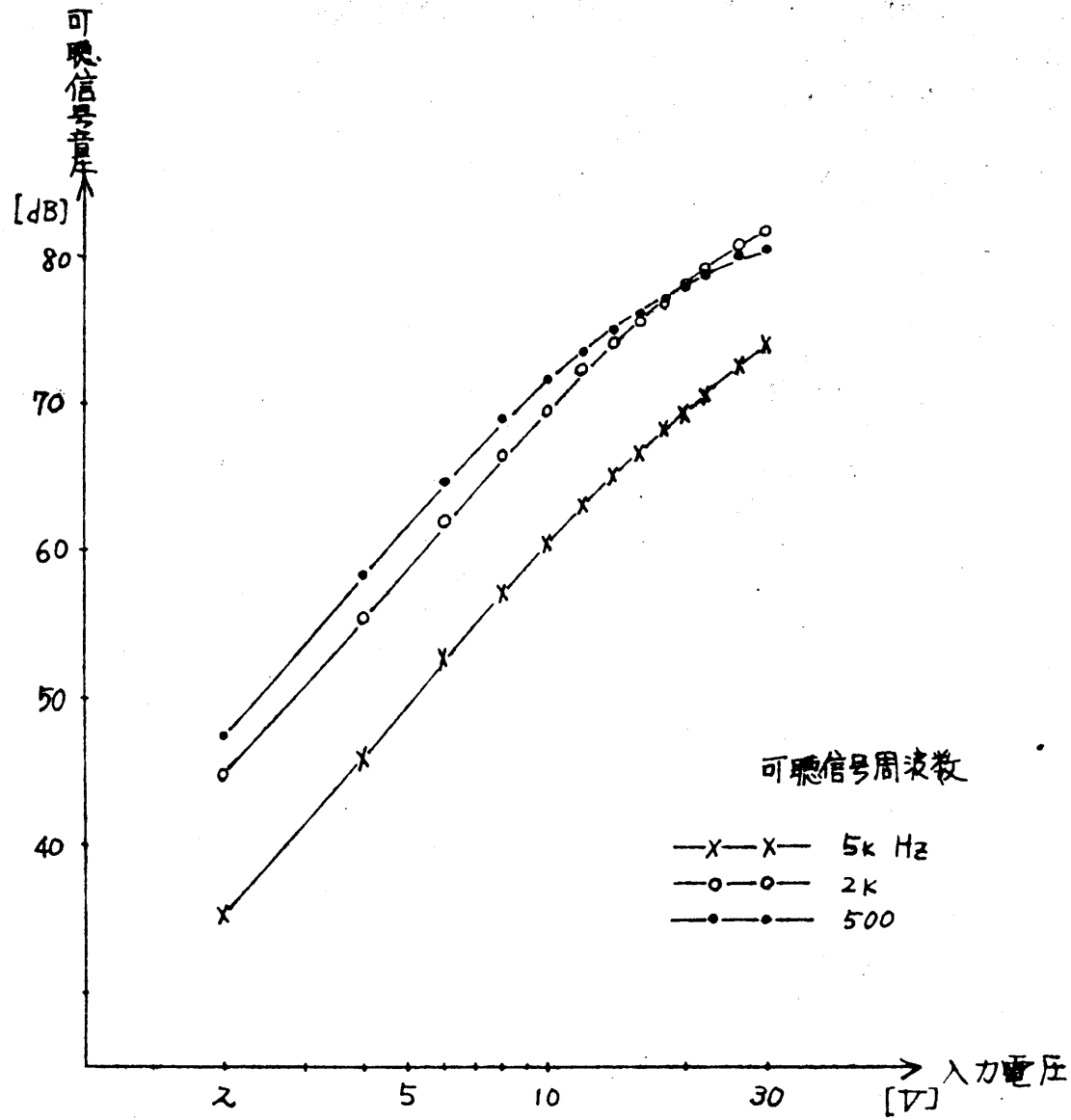


図5 入力電圧に対する可聴音圧特性 $m=0.5$

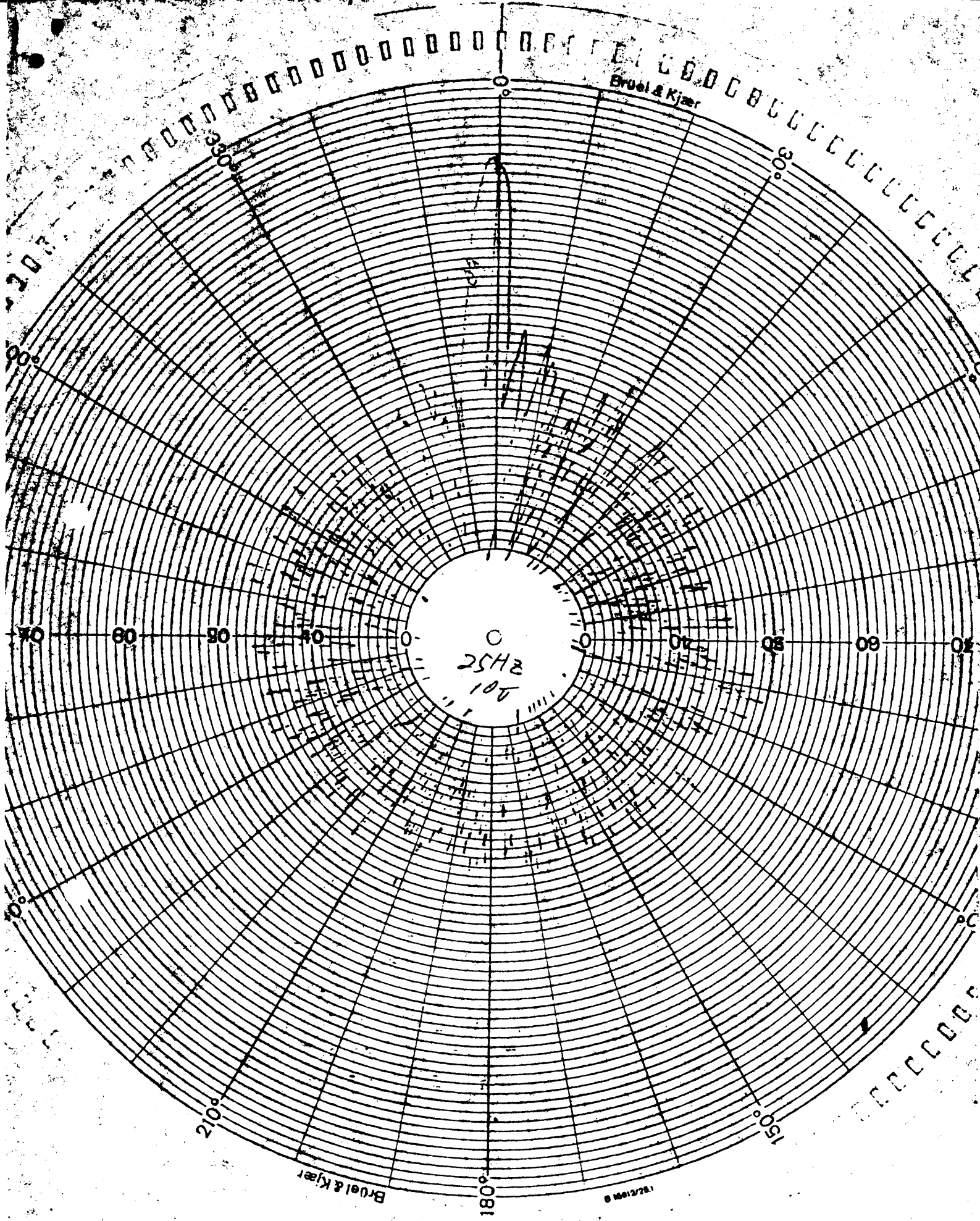


図6 可聴音の指向特性 25Hz

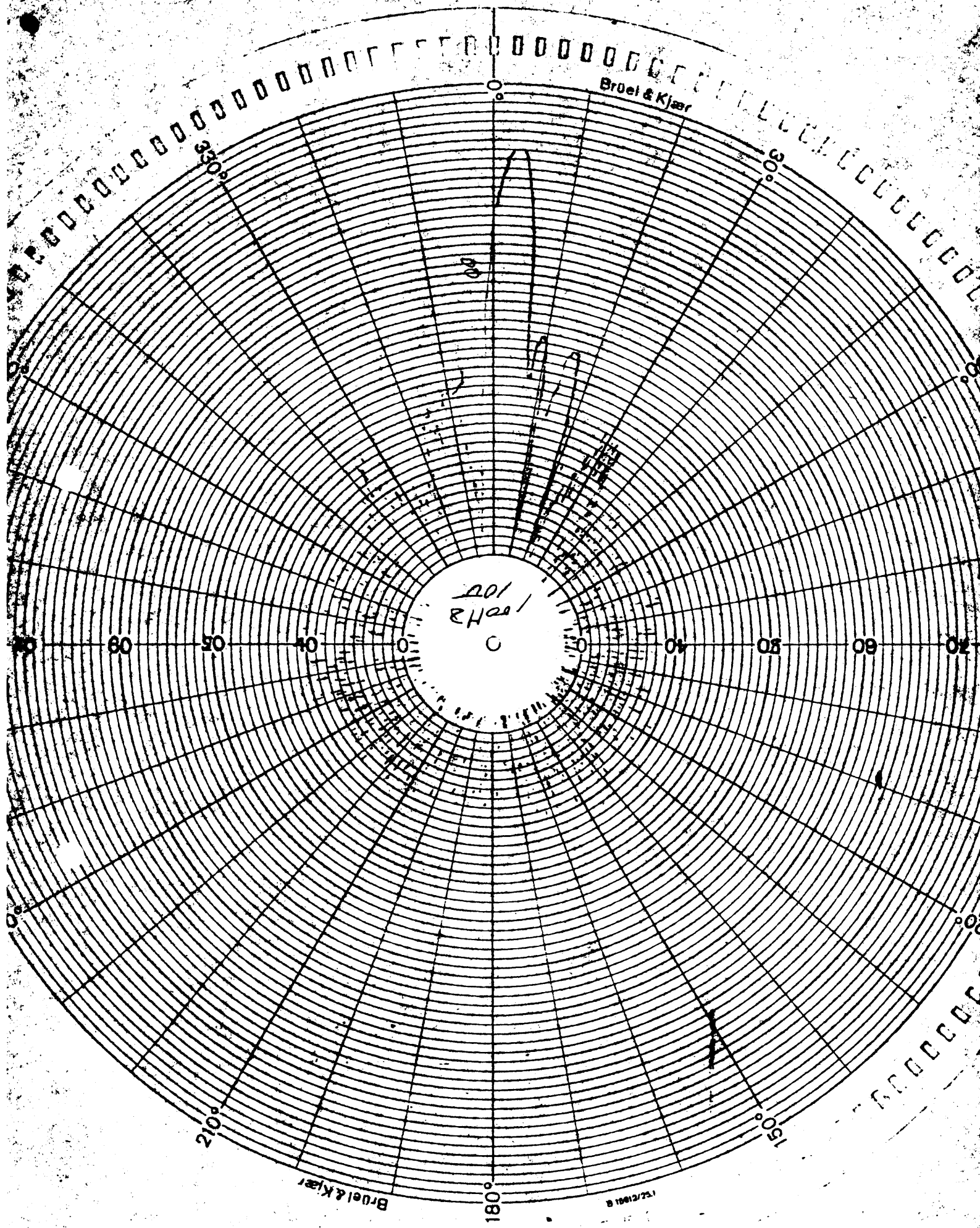


図7 可聴音の指向特性 100Hz

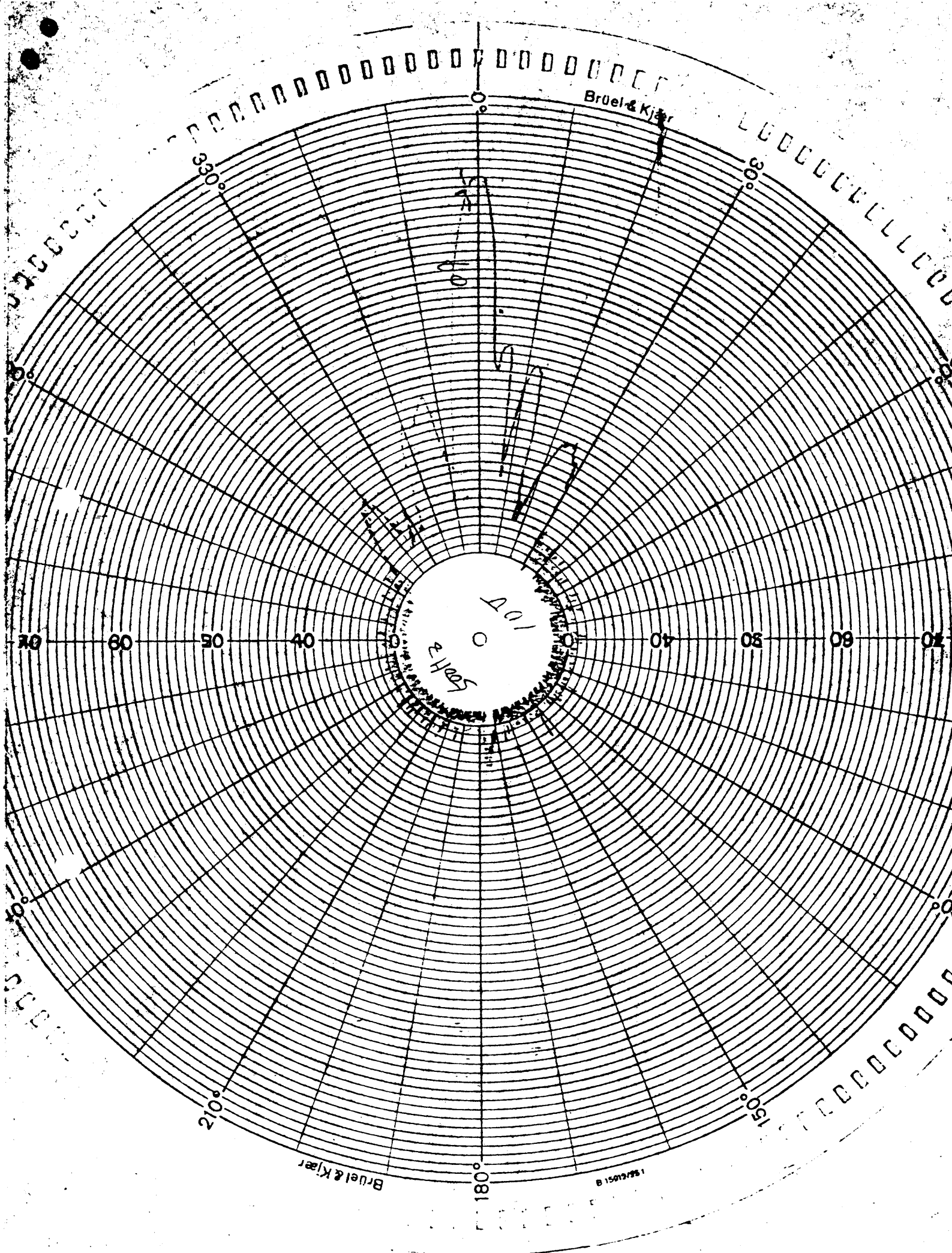


図 8 可聴音の指向特性 500Hz

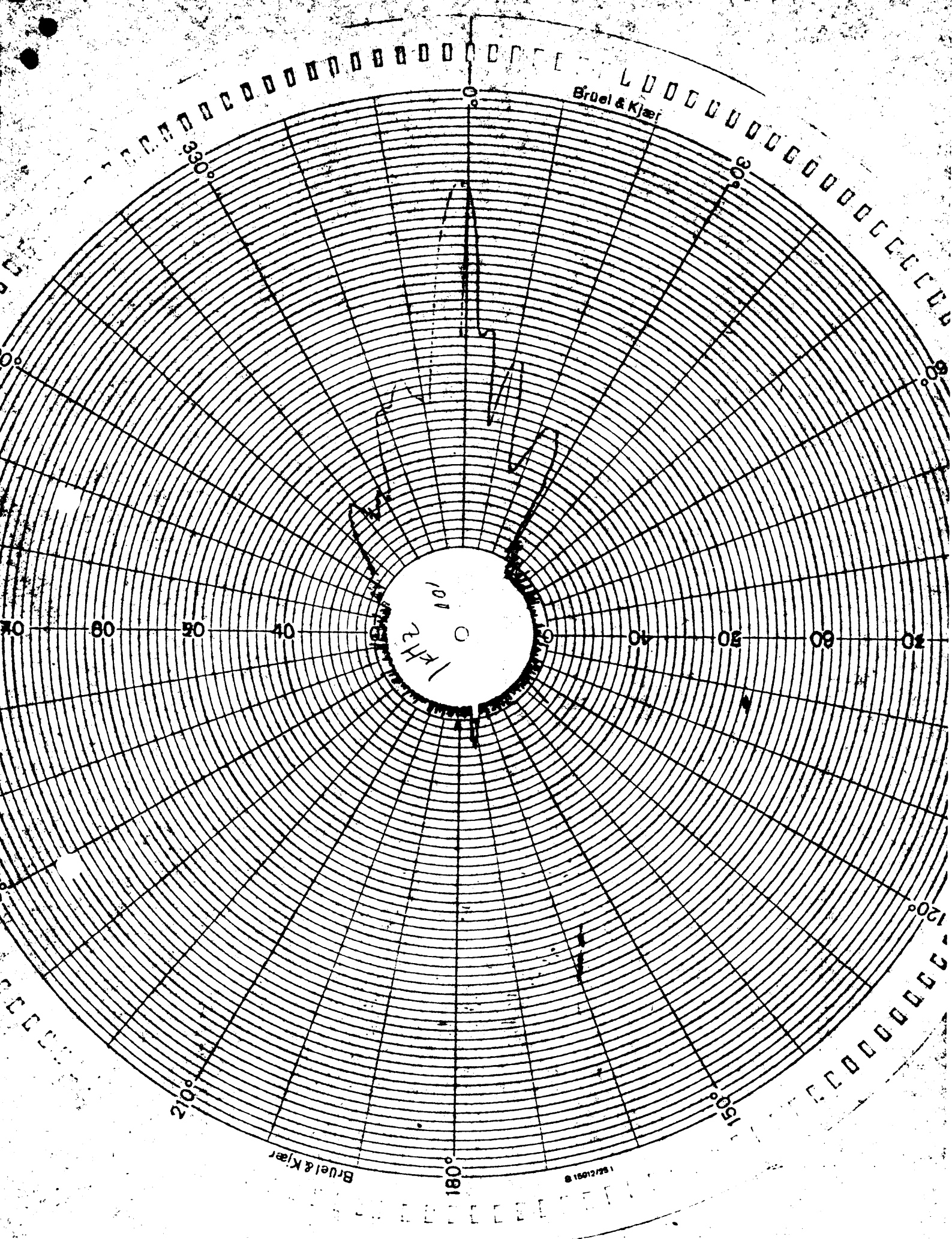


図9 可聴音の指向特性 1kHz

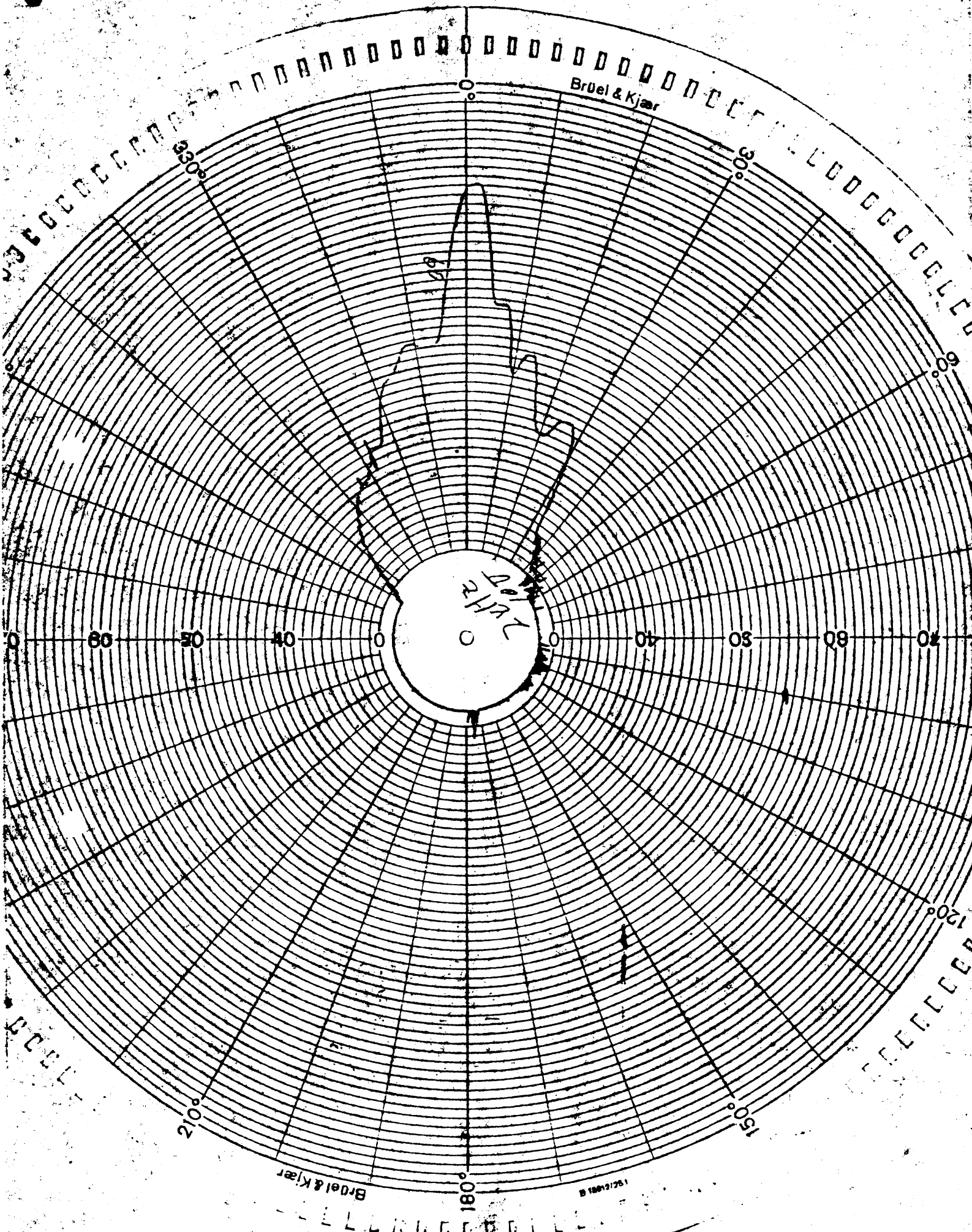


図10 可聴音の指向特性 2kHz

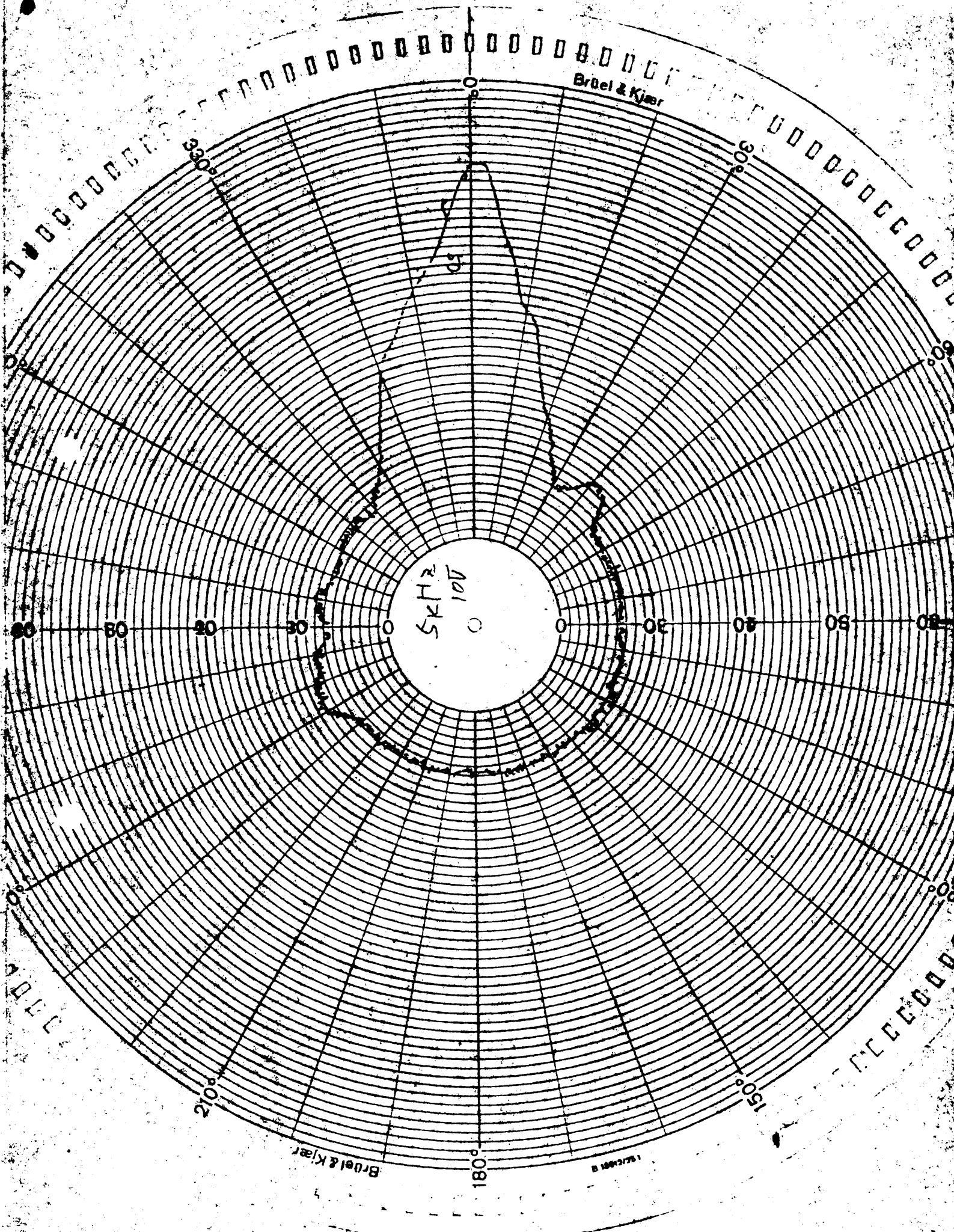


図11 可聴音の指向特性 5kHz

-17-

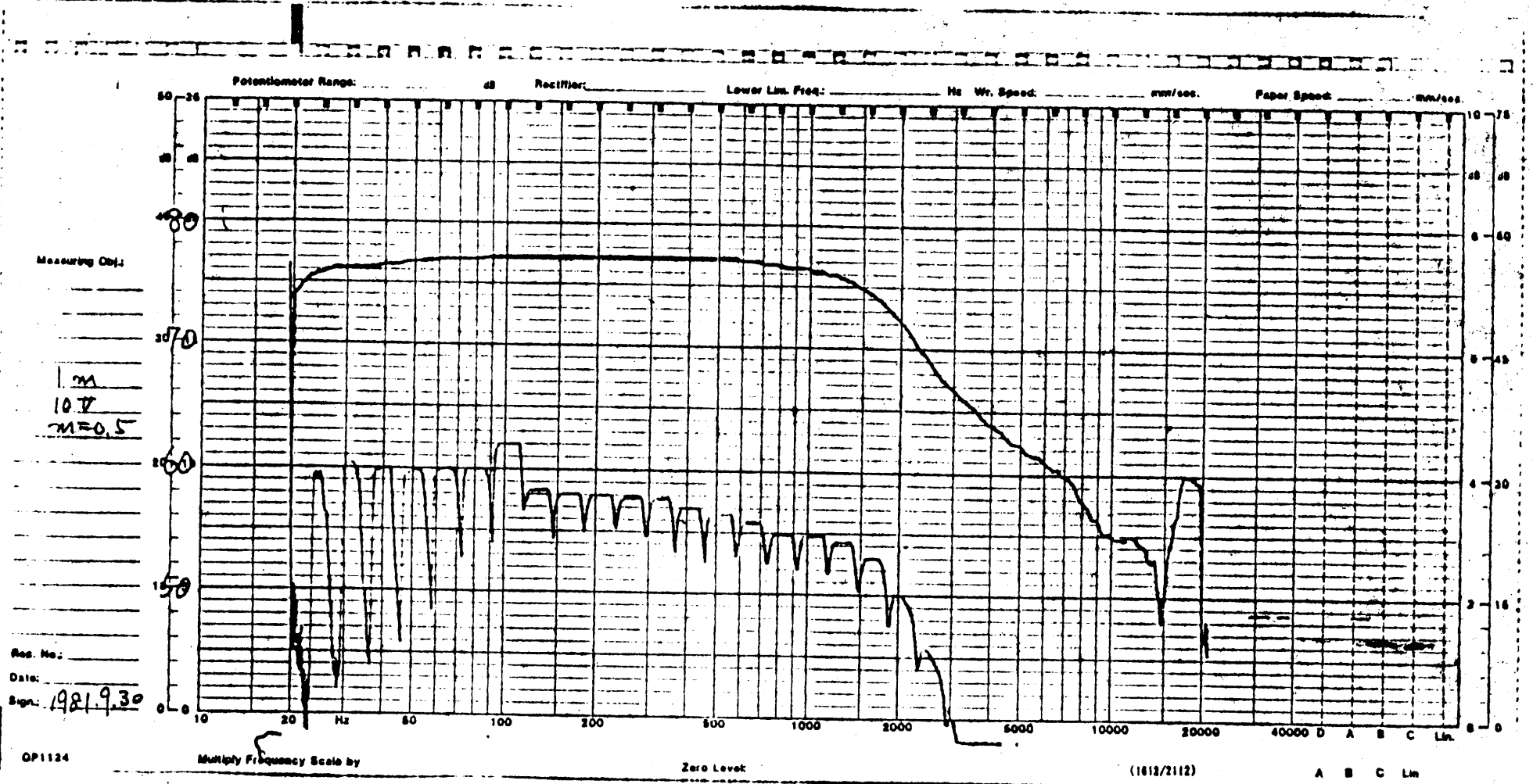


図12 可聴音の周波数特性
 PL1の入力電圧 10V
 $M=0.5$

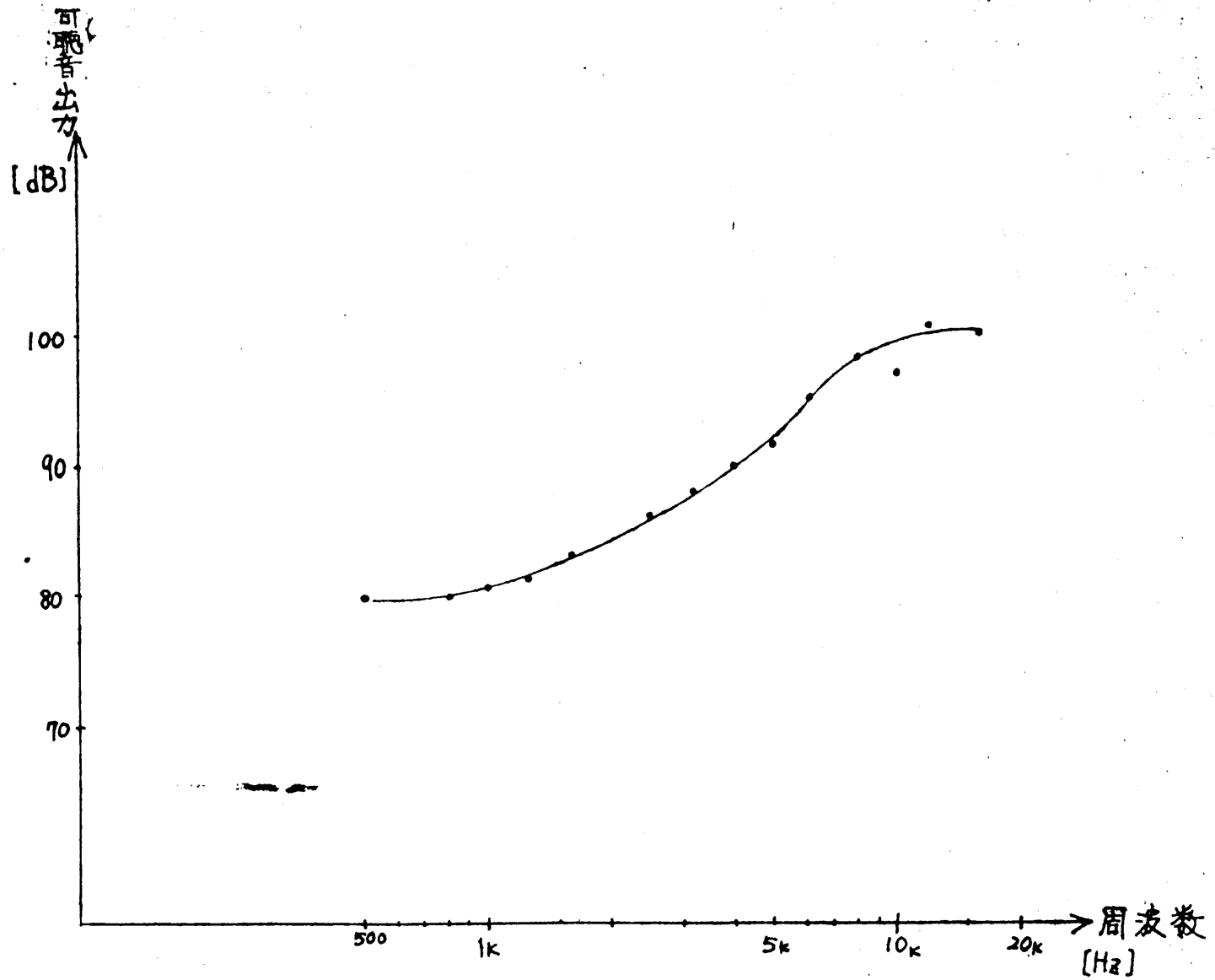


図13 超音波振動子の周波数特性を補正した可聴音圧特性
(アライハの入力電圧 15V)
 $m=1.0$

-19-

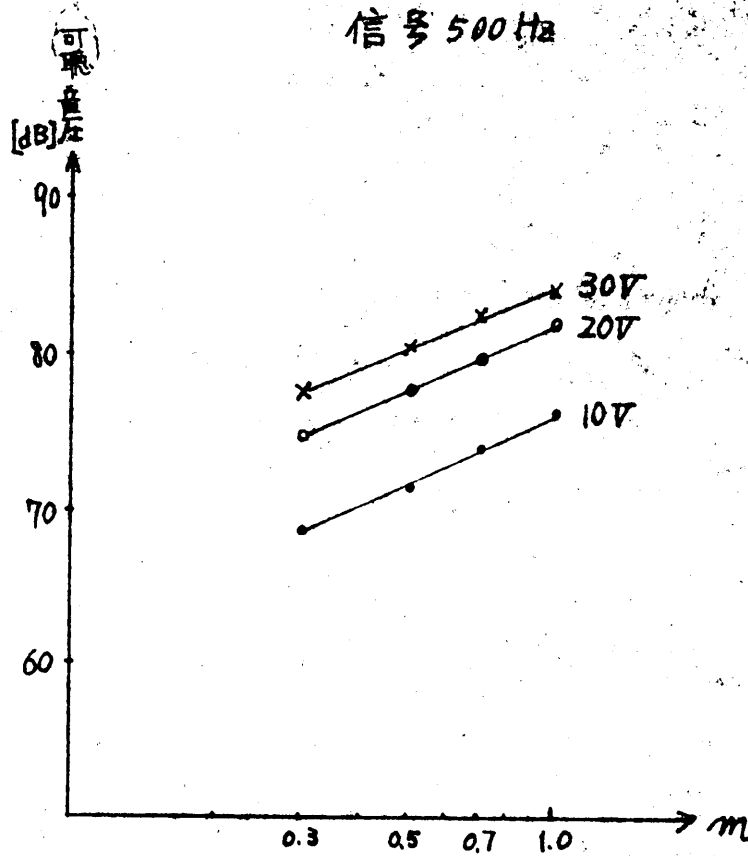
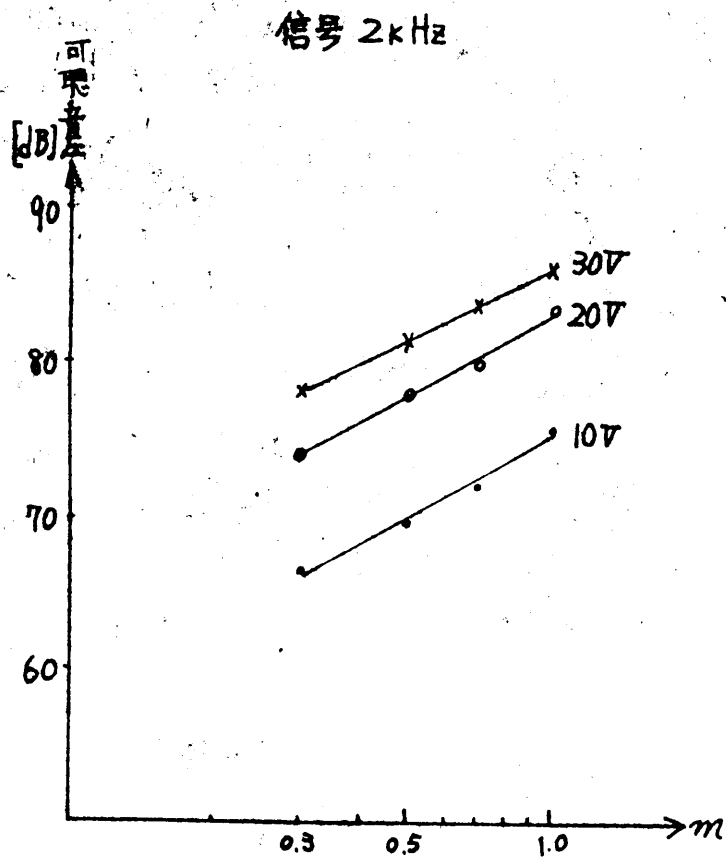
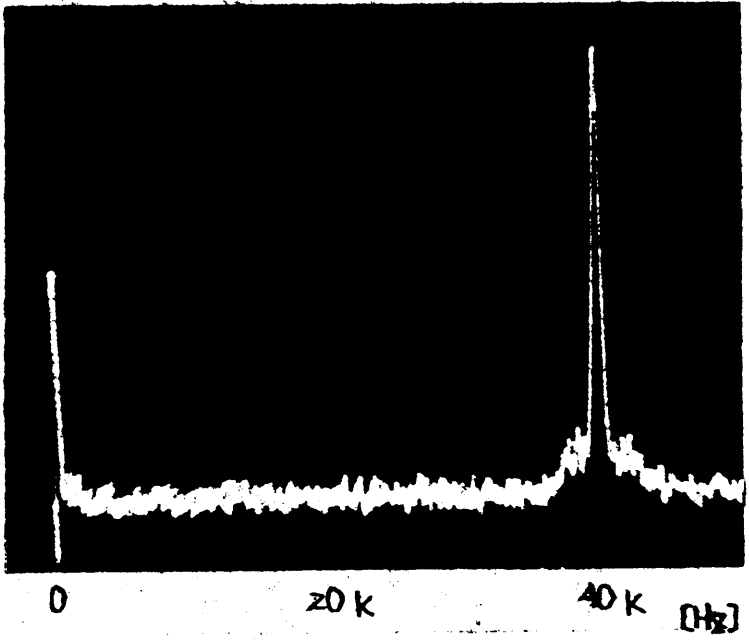


図14 m の変化による可聴音圧変化

図15 変調度変化

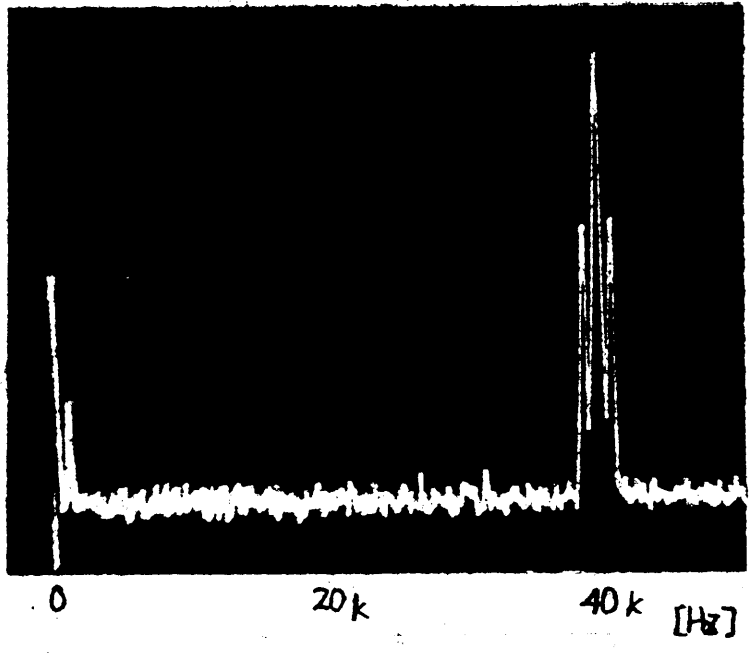
キャリア周波数 39.3 kHz
 信号周波数 1 kHz
 入力電圧 10 V
 送波器との距離 2.0 m

i)



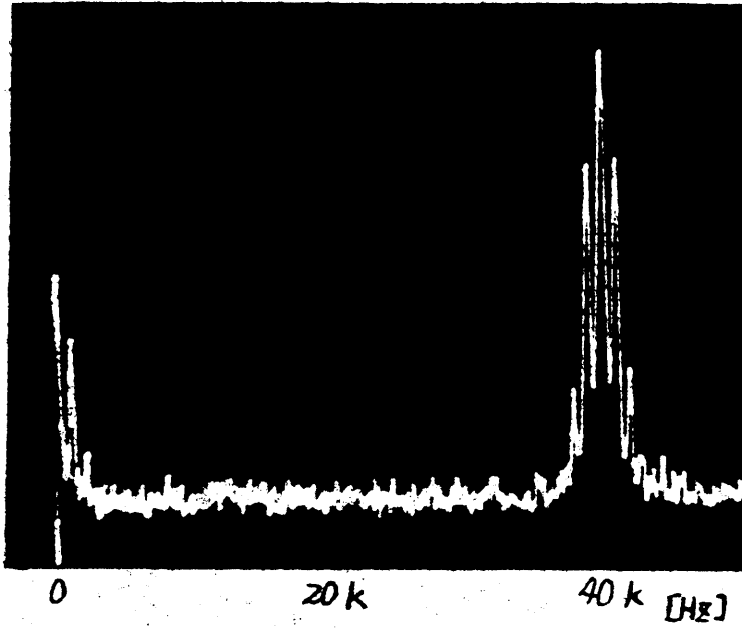
変調度 $m = 0$

ii)



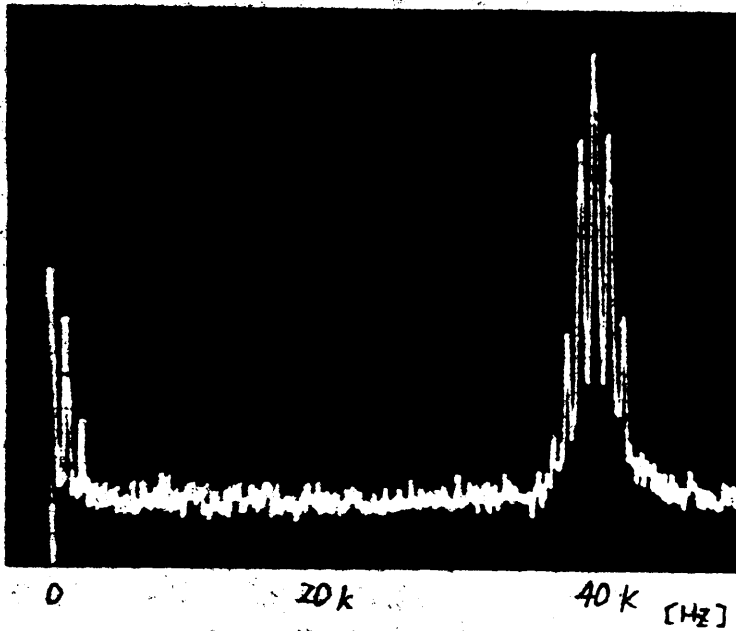
$m = 0.1$

iii)



$m = 0.3$

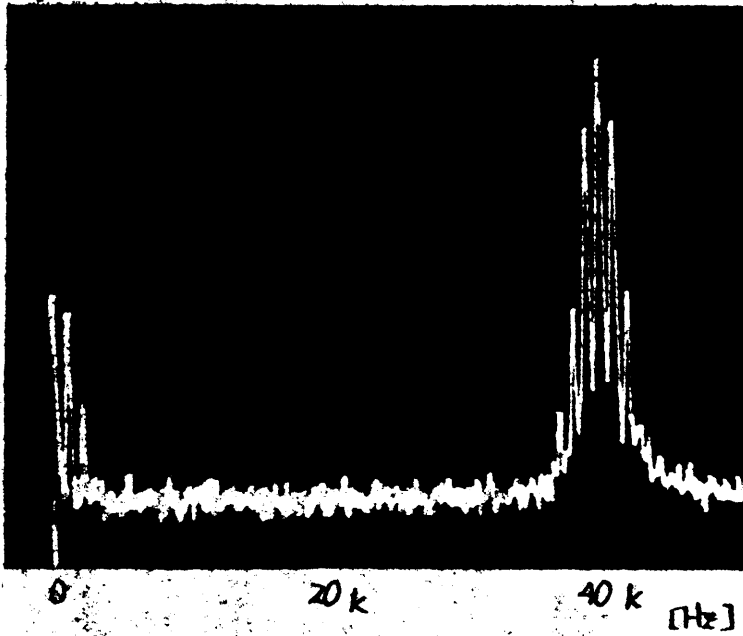
iv)



$m = 0.5$

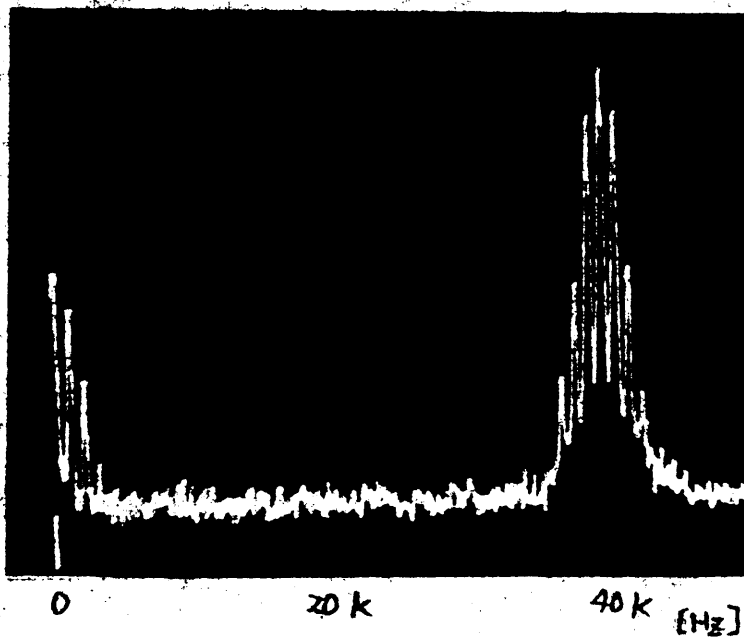
ひびき率 10%

v)



$m = 0.7$

vi)



$m = 1.0$

ひ下み率 25%