

粉末図形による模型室内音場分布の図示

佐藤孝二・子安 勝・中村俊一（小林理学研究所）

久保 啓一（東京大学航空研究所）

宮原 百合子*（学習院大学）

（昭和35年1月28日 受理）

The Illustration of Sound Field Distribution in a Model Room by Means of Dust Figure.

Kozi SATO, Masaru KOYASU, Shun-ichi NAKAMURA

(Kobayashi Institute of Physical research)

Keiichi KUBO (Aeronautical Research Institute, Tokyo University)

Yuriko MIYAHARA (Gakushuin University)

(Received January 28, 1960)

Not to speak of the wellknown ripple tank method, various methods for model experiment on room acoustics have been designed to meet the purpose of respective investigations.

Here, we propose a convenient method for the study of steady state sound field.

A two dimensional model of a room, of for example $40 \times 50 \times 5$ cm, covered with a thick glass plate is made, and the air in the model is excited by pure tone with a loud-speaker mounted in its corner. When the frequency of sound from the loud speaker is equal to the resonant figure formed of groups of plaits. The figure varies its shape depending on the frequency, that is to say the mode of vibration of the air in the model.

By observing the cork dust figure, one can visualize the sound pressure distribution of standing waves in the model, in another words the position of pressure maxima and pressure nodal lines, just as reading a map. As regards to the particle velocity of the air, one can compare its magnitude and direction at each point in the model, from the height and the direction of cork dust plaits.

In this paper, some fundamental natures of dust figure and one of the applications of this method are reported.

Relations between fineness of cork dust and space of dust plaits, height of plaits and sound particle velocity measured in a one dimensional model. Using two dimensional models, pressure contours are measured and compared with dust figures in various cases of frequency and different shapes of models.

In the last section of this paper, the deformation of the pressure distribution and the frequency shift of normal modes from the rectangular case, when some types of projection are planted on one side of the rectangular model are reported.

Mounting several loud-speakers apart, separate observations on each one of the degenerated modes of vibration were made possible.

The dust figure method was very convenient for instant discrimination of vibration in the model room.

* 現在ソニー株式会社

§ 1. ま え が き

室内音響の模型実験は、設計の段階での室の音響的性質の予測や改良案の検討など、音響設計の実際的な面ばかりでなく、室内の音の性質をしらべる基礎的な研究にも利用される。

模型実験は多くの研究者によって企画、開発されてきたが、着目する問題により、複雑な音の現象の単純化にいくつかの工夫が行われている。

いわゆる幾何的音響の立場から、室内の音の伝播に着目し、水の表面波や光を音波になぞらえたものなどはよく知られている。

しかし、実際の室での音響現象は、様々な原因のより集まった複雑なもので、単純化、理想化された実験だけでは説明のつかぬことも多い。とくにさきのような音の波動性を弱視する幾何的音響の立場で室内のとの問題を扱う場合には、その適用限界を十分検討したうえでなければならない。

われわれは、室内の定常的な音場をしらべる手段として、“クントの実験”の拡張ともいえる粉末図形による模型実験を試みた。これはさきに小林理学研究所に建設された残響室の設計にあたって基礎実験の一つとして用い、すでに一部報告されている¹⁾。ここでは、粉末図形の基本的な性質についての研究を中心にして、室内音響の模型実験の一つとしての粉末図形法の立場と可能性とを明らかにしたい。

§ 2. 粉末図形法の概要

Knudsen は室の残響の性質をしらべ、室内の音は、室の固有振動に深い関係があることを示した²⁾。とくに、反射性の壁で囲まれた小さな室では近似的な幾何音響ではなく、その室の固有振動に着目した波動音響的な扱いが必要である。

このような領域では、室内の定常状態音圧分布は、音波の干渉によって非常に複雑になる。これをしらべるには、従来はマイクロホンを移動して多くの点の音圧を測定しなければならなかった。しかしこれでは、分布が少し複雑になると測定の

むずかしさは急激に増すので、より簡便に全体の様子のでわかる方法が望まれていた。

粉末を用いて音波の干渉図形をつくることは、クントの実験として広く知られているが、すでに前世紀末に二次元的な立場についての実験も行われている。

われわれの一人(佐藤)は再びこれを取りあげ、新たに室内音響の実験に対応することを提案した。

装置は、縦横 40~100cm、高さ数 cm の室の平面模型と、発振器、ホーンスピーカーのドライバーユニットを駆動する強力な電力増幅器、それに撮影装置とからなる。



Fig. 1 Equipments of the dust figure method

模型の床には一面に粉末を播くが、密度の小さい物質のほうが、粉末図形の音に対する感度はよい。われわれは材料の入手の便、保存などを考えコルクの粉末をえらんだ。この実験には 30 ~ 80 メッシュのものが適しているが、きれいな図形をうるためには、なるべく粉末の粗さをそろえるとよい。

模型に厚いガラス板で蓋をし、スピーカーで純音を鳴らすと、その周波数が室の固有振動に一致

粉末図形による模型室内音場分布の図示

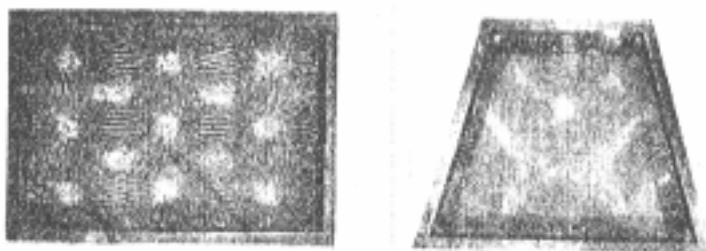


Fig. 2 Dust figure of normal mode of vibration (reference 1)

したとき、コルク粉がいくつもひだ状に立ち上がり写真のようにその固有振動に応じた図形がえられる。

後に示すように、粉末図形は模型内にできている定常波の音圧節線附近を中心に、互いに平行な1群の縞からできており、この1本1本は、その場所での等音圧線の向きとほぼ一致している。そこでこれをみれば、ちょうど地図の等高線を見るように、模型内の定常波の分布を一目で知ることができる。

室の形を変化させると固有振動の周波数、音場などが影響を受けるが、粉末図形によってこれらの関係をしらべることができる。

われわれの粉末図形法は、波動音響的な立場による実験で、定常態の音場の解析に役立つ。従来の方方法にくらべ一時に全体が図示され、簡便でもあるので、利用の方面も広いとおもう。

§ 3 . 粉末図形の性質

粉末図形の性質をしらべるために、われわれは2つの実験を行った。

1つは、一次元模型を用い、音場と粉末図形との関係を知り、粉末の密度や粗さの図形に対する影響をしらべた。

他は、二次元模型について、周波数、室形などの種々な条件のもとで等音圧線を実測し、粉末図形との関連を検討した。

3 . 1 室の固有振動と内部の音場

反射性の壁で囲まれた空間では、音波は特定の周波数で共振し定常波をつくる。理論的には、この周波数は、音の波動方程式がその空間の境界条

件のもとに持つ固有値として導かれる。そしてその方程式の解は、内部の音場を表現する。しかし、この計算は一般の場合には困難で、特殊な形の境界について数例が解かれているにすぎない。

直方体の空間については、壁が硬く滑らかな場合、固有振動

数 ν_n は (1) 式であらわされる。

$$\nu_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{q}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{r}{L_z}\right)^2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで c は音速、 L_x, L_y, L_z は直方体の三辺の長さ、 pqr は $0, 1, 2 \dots$ である。

さらに ν_n における波動方程式の解から、この空間内の任意の点 (x, y, z) の音場は、音圧、空気粒子速度について (2) ~ (6) 式のようになる。

$$P = \cos \frac{\pi p}{L_x} x \cdot \cos \frac{\pi q}{L_y} y \cdot \cos \frac{\pi r}{L_z} z \cdot \sin 2\pi \nu_n t \dots \dots \dots (2)$$

$$V_x = \frac{p}{2\nu_n L_x \rho} \sin \frac{\pi p}{L_x} x \cdot \cos \frac{\pi q}{L_y} y \cdot \cos \frac{\pi r}{L_z} z \cdot \sin 2\pi \nu_n t \dots \dots \dots (3)$$

$$V_y = \frac{q}{2\nu_n L_y \rho} \cos \frac{\pi p}{L_x} x \cdot \sin \frac{\pi q}{L_y} y \cdot \cos \frac{\pi r}{L_z} z \cdot \sin 2\pi \nu_n t \dots \dots \dots (4)$$

$$V_z = \frac{r}{2\nu_n L_z \rho} \cos \frac{\pi p}{L_x} x \cdot \cos \frac{\pi q}{L_y} y \cdot \sin \frac{\pi r}{L_z} z \cdot \sin 2\pi \nu_n t \dots \dots \dots (5)$$

$$\vec{V} = \vec{V}_x + \vec{V}_y + \vec{V}_z \dots \dots \dots (6)$$

われわれは、与えられたこの結果を手がかりに、粉末図形と音場との関係をしらべる実験を進めた。

3 . 2 粉末のひだの間隔、高さと言場

音場の条件を簡単にするために、縦横各 5 cm 長さ 45 cm の模型室をラワン材でつくった。この寸法では、3000 サイクル以下では長さ方向の共振だけが存在するので、この範囲では一次元的

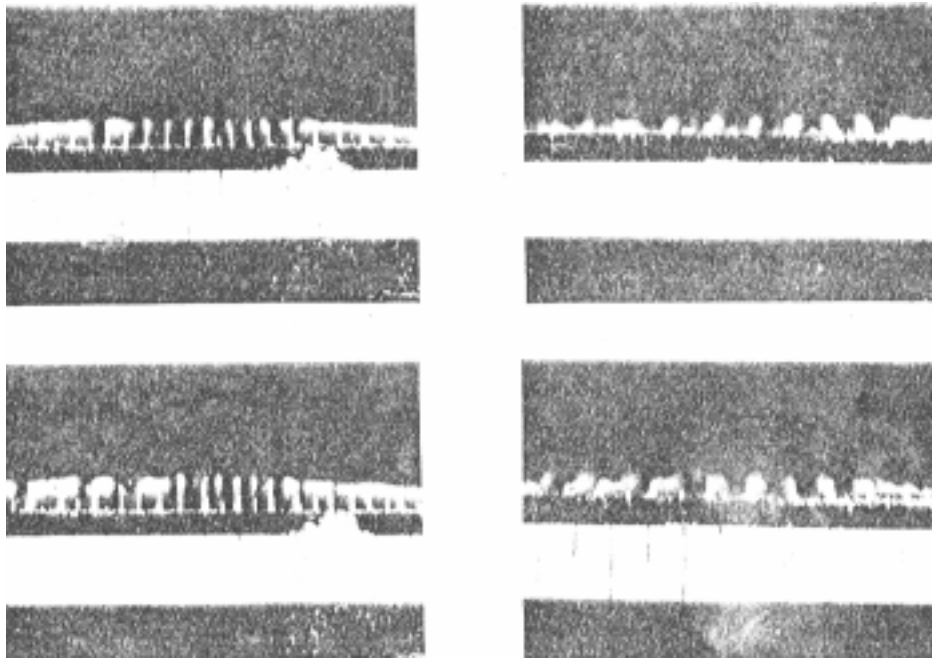


Fig. 3 Partially enlarged side view of plaits in a one dimensional model. Upper and lower photographs were taken under same magnitude of sound particle velocity respectively, using 30 ~ 60 meshes (right), and 80 ~ 100 meshes (left) cork dust.

など模型と考えられる。

模型室の一端に直径 1 cm の穴をあけ、ホーンスピーカーのドライバユニットをとりつけ、他の端ではプロブマイクロホンで音圧をうけ、増幅してメーターに導いた。

模型のガラス面が側方を向くように置き、粉末図形を横から撮影した。

スピーカーの音の周波数を模型の固有振動数に合わせて出力を徐々に強めてゆくと、共振のモードに対応して、いく群かの粉末のひだができる。音をさらに強めるとひだの高さは増すが、ある程度以上は吹きとばされるようになって成長しない。

いく条かのひだが集まってできた各群の間隔はそのときの音の波長の $1/2$ になっている。また、ひだの最も高いところは、音圧極小の場所に対応するが、さきの(2)(3)式によれば、そこは空気粒子速度極大の位置であることがわかる。

このようにしてできるひだのうち一群について、粉末の粗さ、音の大きさを変えたときのひだ

の成長の写真を Fig. 3 に示した。

この写真でもわかるように、同じ音の強さでも粉末の粗さによって、ひだの高さ、ひだとひだの間隔が異なる。

まずひだの間隔は、周波数、音の強さにはほとんど関係なく、粉の粗さだけできまる。

Fineness of cork dust (meshes)	Space of plaits (mm)
30 ~ 60	6.0
60 ~ 80	4.5
80 ~ 100	3.5
100 ~ 150	3.0

つぎにひだの高さは、周波数によらず、粉の粗さや音の強さによって変わるが、(2)および(3)式によって、ひだの高さがその場所の空気粒子速度と関係があると予想される。

これを確かめるために、音源と反対側の壁に吸音材料をとりつけ、同じ実験を行った。

管の端の吸収の多少によらず、内部の定常波に

粉末図形による模型室内音場分布の図示

ついて(7)式の関係がある。

$$V_{max} = p_{max} / \rho c \quad V_{min} = p_{min} / \rho c \quad \dots (7)$$

われわれはこの関係を使い、管の端で測った p_{max} から V_{max} を推定した。

このとき管の端での吸収の量を変化させても、 p_{max} が一定ならば一定の高さのひだができる。さらに、 p_{max} が一定ならばひだの中心（粒子速度極大の位置）では、(7)式から空気粒子速度は一定になるが、音圧（ p_{min} ）は吸収の程度によって変化する。

このことからひだの高さは、その場所の空気粒子速度に関係あることがわかった。Fig. 4 に、ひだの高さと p_{max} 、粒子速度との関係を示した。この図からわかるように、粉末図形をつくるためには、コルクの粉末を使って空気粒子速度が 30 cm/sec 以上必要で、このとき模型内の最大音圧レベルは 140 ~ 150 デシベルにもなる。

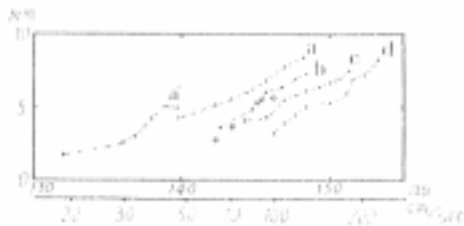


Fig. 4 Relation between the height of cork dust plait and the maximum sound pressure level in the model, or the magnitude of the particle velocity at the point of cork plait. · · ; measured in a vacant model, ◦ ; using the dust of 80 ~ 100 meshes, measured in a model in which absorbing materials are lined. a, a' : 100 ~ 150, b : 80 ~ 100, c : 60 ~ 80, d : 30 ~ 60 (meshes) a' measured at 2600 c/s, the others at 1500 c/s.

以上の実験から、粉末図形の性質をまとめると

- (1) 粉末図形は空気粒子の運動によってでき粒子速度極大の位置を中心にして、いく条ものひだが一群となる。そのひだの方向は粒子速度の方向と直交する。
- (2) ひだの高さは、その場所の空気粒子速度によってきまり、粉末の粗さ、密度にも関係

する。

(3) 一群れのなかでのひだの間隔は粉末の粗さできまり、周波数や粒子速度には関係しない。

3.3 粉末図形と等音圧線

縦横高さそれぞれ 30, 45, 5 cm の矩形模型室をラワン材でつくり、上面には 10 mm のガラス板を金具で締めつけて蓋とした。

ホーンスピーカーのドライバーユニットを直接模型の一隅につけて音源とし、模型の側面からブローブマイクロホン差込み模型内部の音圧を測定した。これとは別にマイクロホン差込みを隅に固定し、この出力によって測定中の周波数変動を監視した。

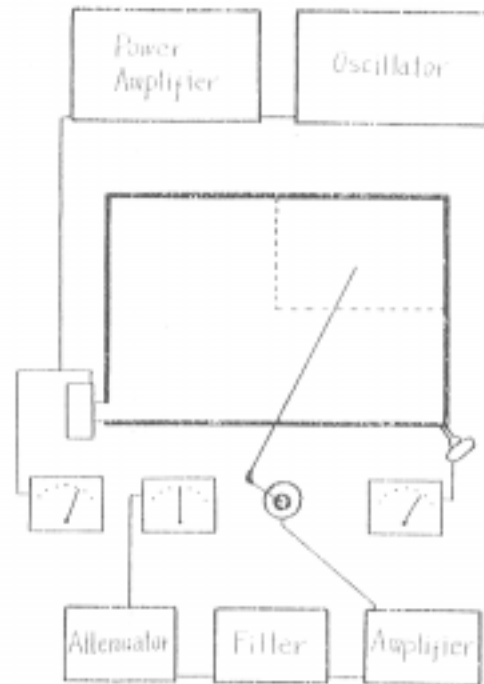


Fig. 5 Block diagram of sound pressure contour measurement.

この模型では約 3000 サイクルまで粉末図形がえられるが、それ以上の周波数では、音源の出力が不足して十分な結果はえられない。

われわれはこの周波数範囲で、矩形模型、その一つの壁に屏風折りの凸凹をつけた場合、三角形

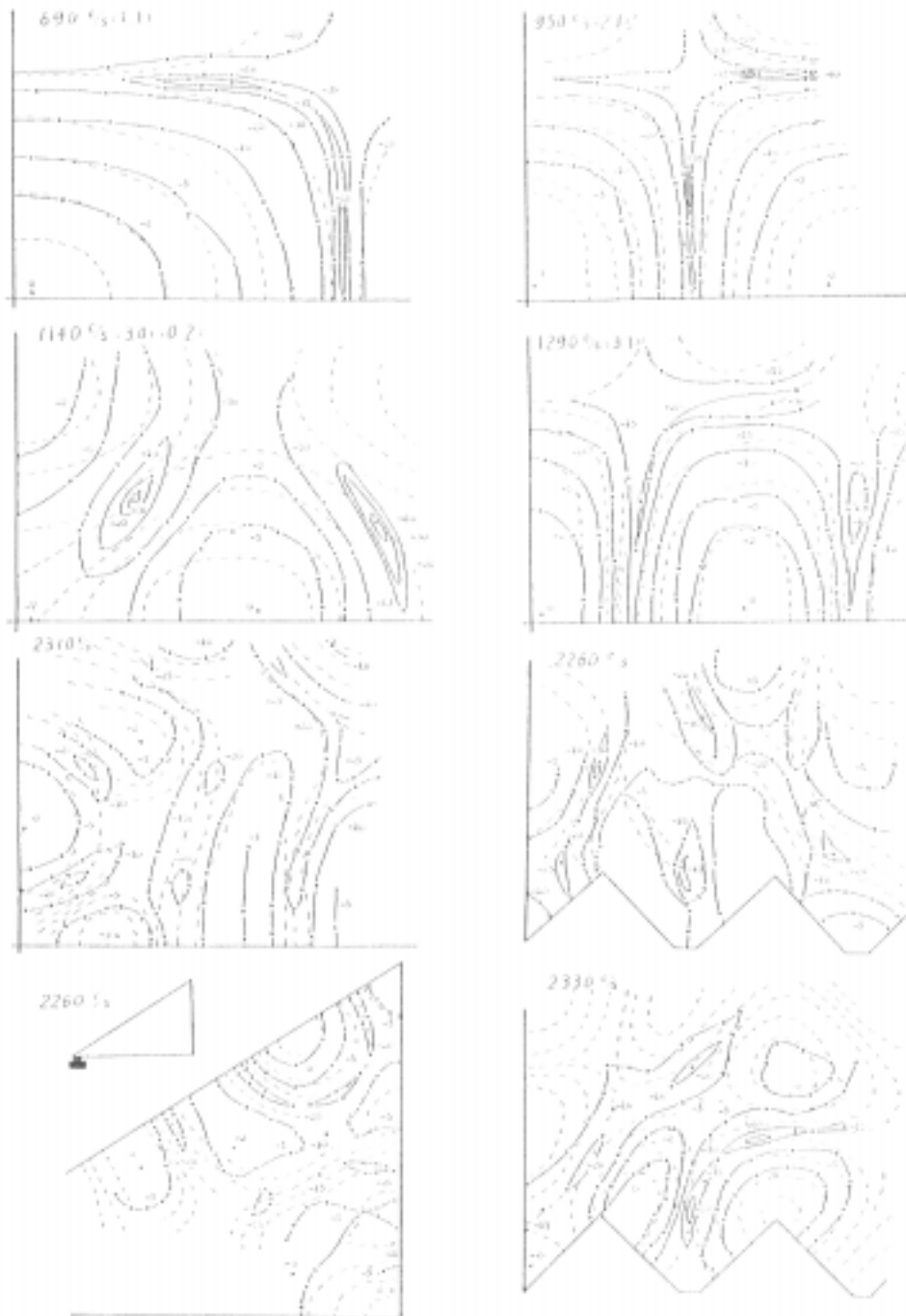


Fig. 6 Pressure contours and dust figures measured in a quarter region of models.
—— Pressure contour, Dust figure.

粉末図形による模型室内音場分布の図示

の模型などについて、単一モードによる共鳴、数個の縮退した共鳴、2つの共鳴の間など周波数をえらび実験した。

音圧は、最大値を任意尺度で0デシベルとし、他の点での値を相対的にあらわした。粉末図形をつくりながら音圧測定をしたので、最大音圧レベル（絶対値）は130～140デシベルである。

プローブマイクロホンの先端をガラスを透して観測し、ガラス面上に測定点を音圧とともに特殊鉛筆で記録した。紙へ写しとって等音圧線を引き同様にしてえた粉末図形の記録と比較した。

3-2でコルク縞の成因に、その点での空気粒子の運動が関係していることがわかった。さらに二次元模型において、壁の近くで壁面に垂直に縞が空気粒子速度の方向に直交してできることが予想される。

このときには、(2)～(6)式の関係から縞模様は模型内音圧分布の等音圧線をそれ自身であらわすことが期待される。実際に測定した結果、その対応はFig. 6の例に示す程度であった。

実測した音圧分布図のところどころに音圧のとくに小さい場所がある。これは隣りあった固有振動も同時に励振され、それらの音圧節線がちょうど重なり合った場合と考えられる。しかしこのような音圧分布は粉末図形にはあらわれていない。この簡単な例としてFig. 7は(1,1)モードに周波数を合せた場合である。(1,1)モードは約110サイクル下に(0,1)、約90サイクル上に(2,0)と隣り合っている。測定の結果をみると、(1,1)の音圧節線に(2,0)の影響があらわれているのがわかる。しかし(2,0)は自身の共鳴からずれた周波数で励振されているために、音源の反対側の壁から $\lambda/4, 3\lambda/4$ の位置が音圧節線になると考えれば、実測の結果を説明することができる。

このような音圧分布の歪みは、二次元的なモードについてはかなり複雑なものになる。

縮退したモードの場合は、それぞれの音圧分布

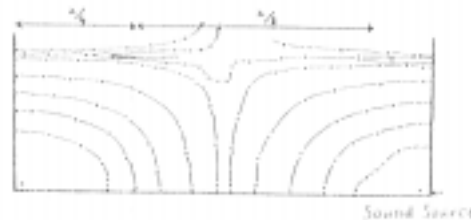


Fig. 7 A simple case of the pressure dips in the model caused by crossed nodal lines of adjacent modes. Figure shows the effect of (2,0) mode upon (1,1) mode. λ : wave length.

の和として全体の分布がえられるが、このとき各モードの位相の関係は重要である。このため、実現される音圧分布には音源の位置が深い関係を持つようになる。

凹凸をつけたり、形を変えたりして計算では予測できないような場合についても、粉末図形と音圧分布とは、簡単な場合と同程度の一致をみた。

この実験から、粉末図形によって模型内の音圧分布が大体推測できることがわかった。とくに壁に凹凸をつけた場合、外形が変化した場合、モードのまざりあった複雑な図形の場合などでもこの関係が変わらないことは、定常状態の音圧分布、すなわち音圧の山や谷、等音圧線の向きなどと室の形との関係をしらべるのに利用できる。また、ひだの高さを読みとれば、場所による空気粒子速度の大小も知ることができる。

§4. 粉末図形法の応用

われわれは、さきにこの方法を残響室設計の基礎実験の一つとして使ったが、ここでは別の例として、室の壁に凹凸をつけたときの固有振動数、定常状態音圧分布に対する影響をしらべた結果をのべる。

模型で扱う周波数をさらに高域までのばすために、さきの実験で用いた模型の縦横が2倍のもの(60×90×3 cm³)をつくった。スピーカーの数を多くして出力不足を補い、3000サイクル付近まで粉末図形をうることができた。これは小さい模

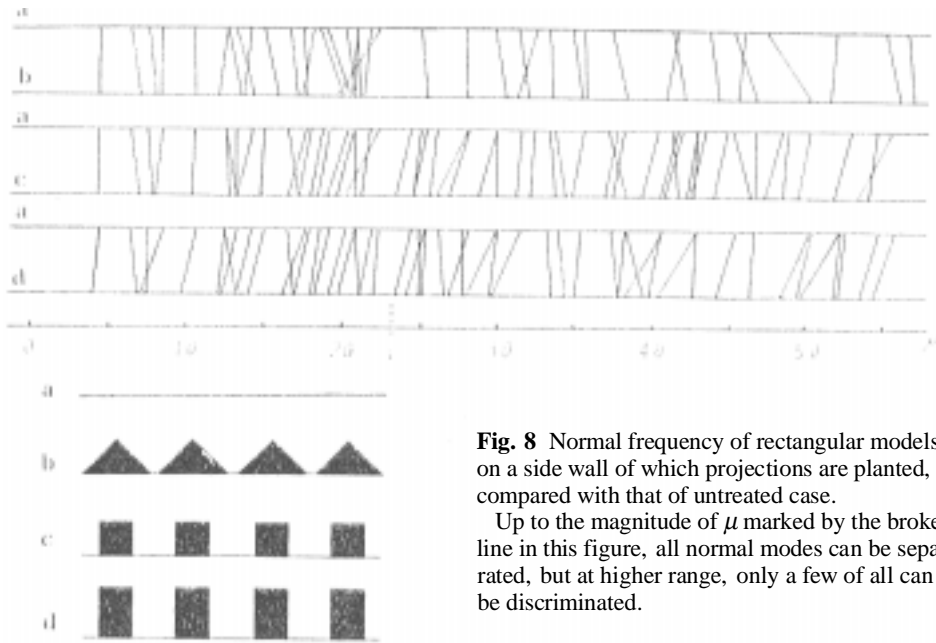


Fig. 8 Normal frequency of rectangular models, on a side wall of which projections are planted, is compared with that of untreated case.

Up to the magnitude of μ marked by the broken line in this figure, all normal modes can be separated, but at higher range, only a few of all can be discriminated.

型からみて、扱う周波数範囲が 2 倍にのびたことになる。2 つの模型の間で、同種の共振は振動数粉末図形ともによく対応した。

模型の一方の壁に、三角形、正方形、長方形の張出しをつけて、壁が平面の場合からの固有振動数のずれ、音圧節線の変化をしらべた。

この実験では、それぞれの固有振動に対する壁面の形の影響を観察するために、縮退したモードはなるべく分離したい。そこで音源を模型の三隅につけ、相互の位相の組合せをえらんで粉末図形をつくった*。この方法によって、高域で多くの固有振動が接近しているところでも、いくつかのモードを単独にとりだすことができた。

* 室の共振モードの 1 つについて、その場所的な振動状態を考えると、吸収が少ないときには、音圧節線を境として隣りあった領域は互いに逆位相で振動している。今、いくつかのスピーカーを分散位置して皆同じ位相で音を出すとする。このときには、室の共振のうちスピーカーをつけた配置の振動が皆同位相になるものだけが励振される。最も簡単な例として、矩形模型について(3・0)(0・2)が縮退した場合、2 つのスピーカーを対角線上の両隅につけ、同位相で鳴らせば(0・2)、逆位相にすれば(3・0)をそれぞれ単独にとり出すことができる。

Fig. 8 に壁に変化を与えた場合の固有振動数の変化を示した。横軸は Bolt にならって

$$\mu = \frac{\sqrt{S}}{c} v_n$$

の変換を与えた³⁾。ここで S は模型室の底面積、 c は音速である。

張出しをつけて周波数の大きく変わるものは音圧節線のずれも大きく、周波数変化の小さいもの



Fig. 9 Dust figure of (3,2) mode.

In this case the normal frequency shifted lower, and we can observe the distortion of the dust figure. This figure is rather similar to that of the case moving the side wall further instead of planting projections.

粉末図形による模型室内音場分布の図示

は粉末図形ももとのままに保たれている。モードによって程度の差もあるが、一般的に、三角形の凹凸では周波数が高いほうへ、四角形では低いほうへずれる傾向がみられる。

測定した例について観察すると、凹凸をつける、それぞれのモードに応じ、凹凸表面の境界条件を満すような音圧分布の変形をおこし、周波数の移動がこれにともなう。凹凸が壁の変形前の等音圧線に直交するようなモードでは、音圧分布の変化、周波数の移動はない。逆に、変形前の等音圧線に沿った凸凹をつけると大きな影響をうけ、音圧分布の変化は凹凸の周囲だけでなく、模型内

部全体におよぶ場合もでてくる。したがって、凹凸の形や数、それに位置がこの領域では非常に重要になる。

この実験例で固有振動の追跡は、隅につけたマイクロホンの出力の極大値と粉末図形とによったが、粉末図形法は一目でモードの種類を識別でき高次のモードもよく見わけることができた。

文 献

- 1) 佐藤孝二, 子安 勝: 日本音響学会誌, 13 (1957) 231 .
- 2) V.O.Knudsen: J.Acoust.Soc.Amer. 4 (1932) 20
- 3) R.H.Bolt: J.Acoust.Soc.Amer. 19 (1947) 79 .