

ダイアトーンが提唱!!

SPキャビネットの振動モード解析 モーダルアナリシスについて

はじめに

スピーカシステムの音質を構成する要因としては大別してスピーカユニットとその配置、ネットワークおよびキャビネット（吸音材を含む）があげられます。スピーカユニットの振動板材料によって音が変わるといのは感性的にも容易に理解できますが、最近ではネットワーク部品、特にコンデンサが問題児としてとりあげられたりしています。音圧周波数特性はほぼ同じでも、音の透明度などで差があることは確かなようです。

一方スピーカキャビネットに関しては、特に低音域において板材、板厚、キャビネットの構造さらに補強の仕方などによって音質が変化することはよく経験することであり、スピーカユニットの次に音質に影響していると言えます。以前はキャビネットを手で叩い

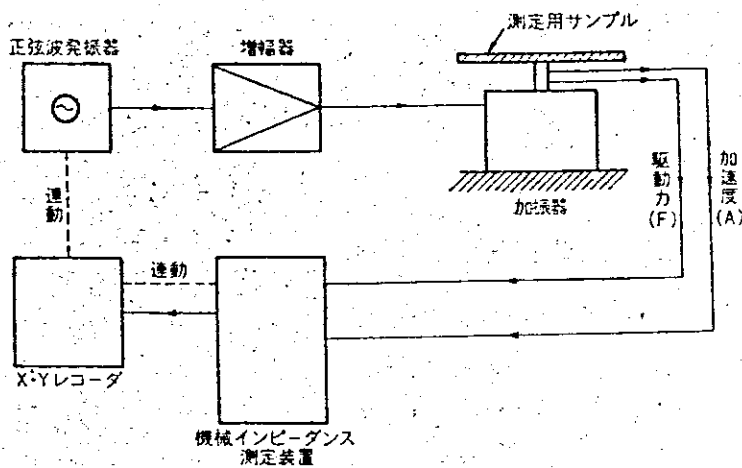
てその響きで板振動を判断し、必要に応じて補強をするという勘と経験に頼っていたわけですが、この経験を定量的に裏付けて行くにはかなりの困難があります。またスピーカユニットとキャビネットが有機的に影響しあっており、それぞれから放射される音を分離して測定するのが難しいということがあげられます。さらに一般的にキャビネット振動は少ない方が良いと考えられていますが、スピーカシステムを一つの楽器と考えれば、キャビネットからの放射音も考え方によっては再生音と考えられ、いわゆる「箱鳴り」に対する考え方の違いという問題もあります。キャビネットの振動とそれによる放射音を再生音に対して悪影響をおよぼすものとして抑えるか、あるいはそれを積極的に利用して共存共栄を計るかは、それぞれ個人の好みの問題ですが、いずれの場合もその内容を十分理解しておくことは重要です。私ども

も以前から種々の方法を用いてキャビネット振動の解明に努力して来ておりますが、今回はその測定方法ならびに若干の結果について、基本となる板材の物理測定から始めて、最新の測定技術であるモーダルアナリシス法までをご紹介します。

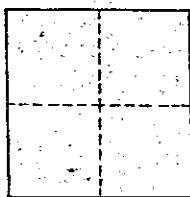
スピーカキャビネットの板振動発生原因について

スピーカキャビネット板振動の発生原因としては、50mmHgの真空中等でキャビネットを測定した結果、(I)キャビネットの内部音圧に起因するもの、(II)振動板の反作用による振動がフレ

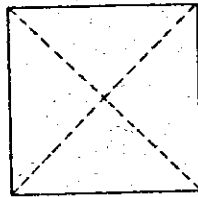
鈴木 英男
森田 茂修
八嶋



【第1図】ヤング率測定法



(a) 1次振動モード



(b) 2次振動モード

【第2図】正方形板の振動モード (支持条件: 4辺フリー)

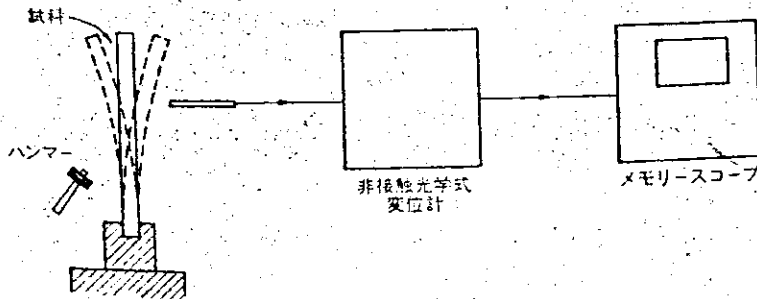
ームを介してパッフル板を駆動し、キャビネットの板振動となるものの二つがあり、(I)は主に低音域において生じ(II)は全周波数帯域にわたっており、低音域では(I)と共存し、中・高音域においては支配的になることがわかっています。また(II)に起因する振動はまずパッフル板を駆動し、パッフル板から側板、天板および底板に振動が伝達して裏板に伝わっているわけです。

したがって、スピーカキャビネットの板振動を低減させるとすれば、基本的にはフレームの振動がパッフル板に伝わりにくいようにすれば良いわけですが、スピーカユニットの特にウ

ーファの重量が問題となって構造上非常に難しく、どうしてもパッフル板に振動が伝達されます。そこで、パッフル板の強度を増して振動しにくくしたり、各板の接合部の強化や補強材によってパッフル板やキャビネットの板振動を低減させる等の対策を行なっているわけです。

スピーカキャビネット材料の物性測定法

まず、スピーカキャビネットを構成する板材料の物理定数の測定法について説明します。



【第3図】ロスファクタ測定系

キャビネット材料に必要な物理定数としては、密度(ρ)、ヤング率(E)、ロスファクタ(η)があります。ヤング率は板の曲げに対する強度を表わし、ロスファクタは振動の減衰特性に関係するものです。

第1図にヤング率の測定系を示します。測定法としては、板材料を適当な大きさのサンプルとし、ある支持方法(ここでは四辺フリーとしています)のもとに振動させ、その共振周波数を測定してヤング率を計算します。

正方形の板を例として1次および2次の振動モードを第2図(a)、(b)に示します。図中の点線は振動の節を示しています。

さて、第1図の測定法によって得られた共振周波数(f_1)を次式に代入することによって板材のヤング率(E)が求められます。

$$E = 2.83(1 - \nu^2) \frac{a^4}{h^3} \cdot \rho \cdot f_1^2$$

ここで ν : ポアソン比

a : 板材の一辺の長さ

h : 板材の厚さ

ρ : 板材の密度

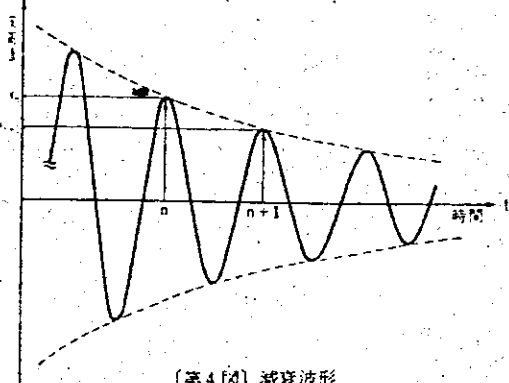
次にロスファクタは、この共振周波数(f_1)における共振の鋭鋭度(Q)を測定し、その逆数から求められますが、減衰特性を求める方法としては、第3図に示すように一辺を固定した試料をハンマー等で叩いて強制的に振動させ、その減衰波形から求めることもできます。またこの減衰波形の周期から共振周波数を求め、上式に代入することによってヤング率を求めることも可能です。

減衰波形の例を第4図に示していますが、第4図に示した減衰波形の波高値(X_n)から減衰比 A を求め、一波ごとの減衰比は常に一定ですから、この減衰比 A から次式によりロスファクタ(η)を計算できます。

$$A = X_{n+1} / X_n$$

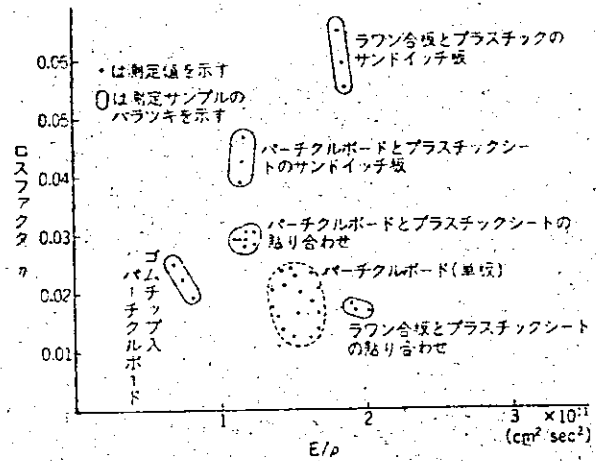
$$\eta = -\ln A / \pi \quad (\ln \text{は自然対数})$$

以上のような方法で板材料の特性を求めることができますが、キャビネットの振動を抑えるためには、 $\rho, E / \rho,$



【第4図】減衰波形

がそれぞれに大きな値を持つ材料が必要となります。
 以上の方法で測定したスピーカキャビネット材料で、単板と複合材料に関するデータを第5図に示しておきます。



【第5図】ロスファクタのデータ

キャビネット板振動の測定法

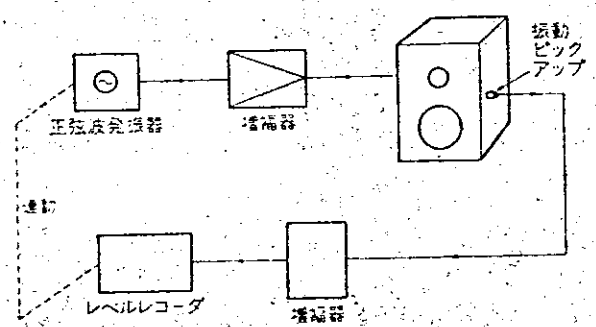
キャビネット板振動の測定法としては、(i) 振動ピックアップによる測定法、(ii) レーザ光を利用したホログラフィによる測定法がありますが、それぞれについて簡単に説明致します。

(I) 振動ピックアップによる測定法

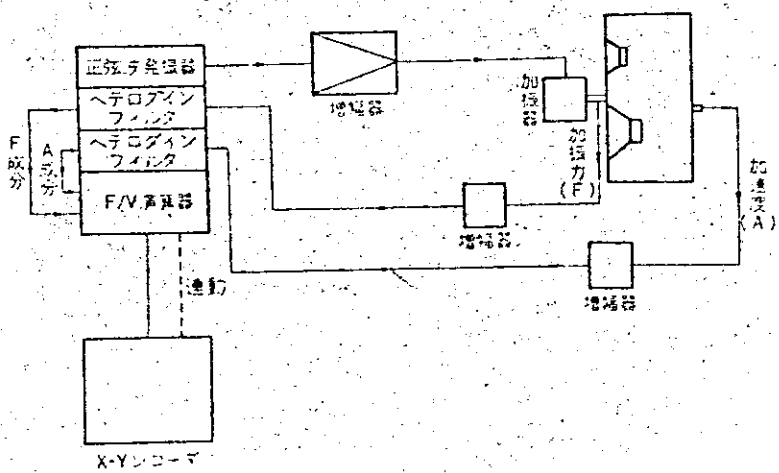
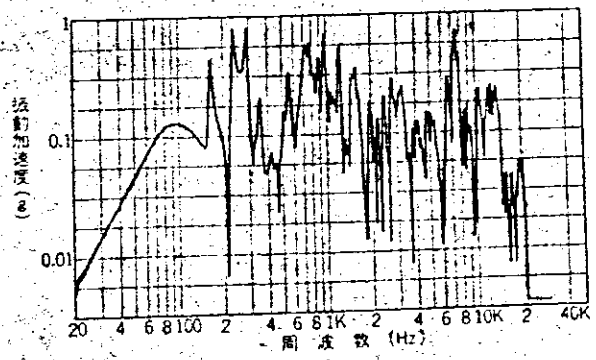
この測定法は、第6図に示すように測定点に振動ピックアップを取付けてアナログ的に板振動の加速度を測定する方法で、この出力は積分回路を通過することによって速度または振幅値として測定することができます。

第7図に実装したスピーカを正弦波で駆動した場合のスピーカキャビネット板振動の周波数対加速度を測定した例を示していますが、スピーカの全再生帯域にわたって非常に多くの共振周波数を持って、キャビネットが振動していることがわかります。しかし、低音域の振動特性はスピーカの置き方によってかなり異なり、硬い床の上に置けば振動しにくく、畳やジュエタンなどの上では振動しやすくなります。このことから、キャビネットの特性だけでなく、その置き方によっても低域の減衰が変わることがわかります。

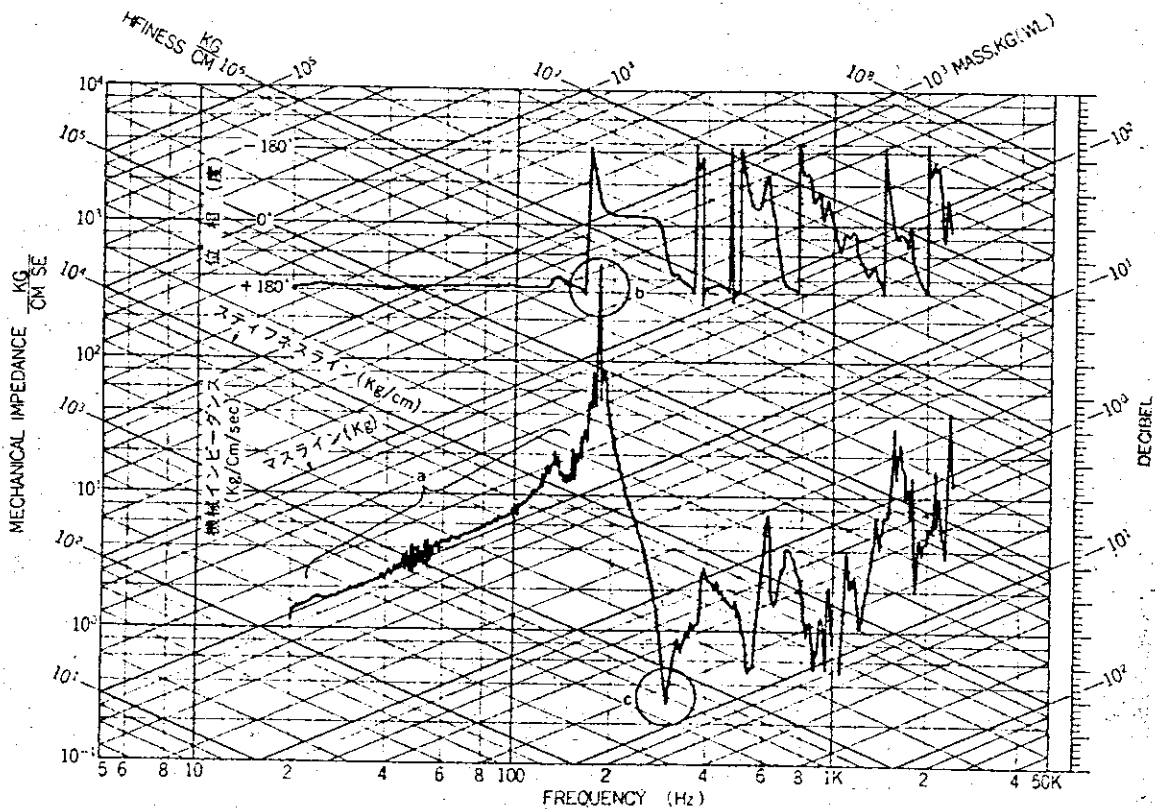
△ △
 (第6図) 板振動測定系



△ △
 (第7図) 振動加速度特性



【第8図】機械インピーダンス測定系



〔第9図〕機械インピーダンス測定結果
9図に示します。

また、振動ピックアップを使用して、第8図に示す方法で機械インピーダンスを求めることができます。この方法は任意の加振力(F)である点を駆動し、各測定点の振動速度(V)を加速度ピックアップを用いて測定し、F/Vという機械インピーダンスを求める演算を行なうと同時に、2倍音間の位相差も測定するものです。測定結果は、駆動点と測定点が同一箇所の場合は駆動点インピーダンス、異なる場合は駆動点から測定点までの伝達インピーダンスと呼ばれます。

スピーカキャビネット板振動の伝達インピーダンス特性の実測データを第

9図で右上がりの軸は質量を示すライン、右下がりの軸はスティフネスを示すラインで、縦軸が機械インピーダンスを示しています。この測定データからわかることは、図中a部の低い周波数では被測定スピーカシステムの重量が全体の質量を示すライン上にあり、この周波数範囲では駆動力が一定の場合振動加速度は一定という正比例の関係になり、b部は機械インピーダンスが極大となっている非常に振動しにくい状態で、反共振点を示し、逆にc部は非常に振動しやすい状態であり、このディップの周波数を1次の共振周

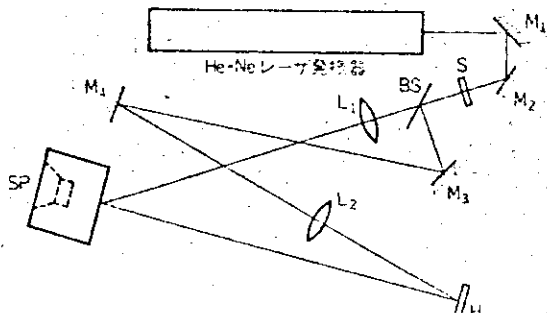
波数といいます。

また、c部よりも高い周波数においては、a部の周波数帯域に比べて振動状態における質量が見かけ上小さくなり、小さな駆動力でもキャビネットが非常に振動しやすい状態にあることがわかります。このことから、硬くて重い材料を使って質量とスティフネスを大きくし、さらに補強梁を有効に入れてスティフネスを大きくすれば、板振動を抑える効果があるといえます。

振動ピックアップによる測定法では、個々の測定点での振動状態を知るには十分ですが、キャビネット振動の全体像をつかまえるには非常に不便です。

〔II〕レーザホログラフィによる振動モードの測定

スピーカキャビネットの各板全面に関する振動状態を観測するには、レーザ光を利用したホログラフィによる測定法があります。ご存じの方も多いと思いますが、この方法は振動面に非接触で複雑な振動状態やマイクロオーダーの非常に小さな振幅測定ができる非常



〔第10図〕ホログラフィ測定系

M₁、M₂:ミラー
L₁、L₂:拡大レンズ
S:シャッター
BS:ビームスプリッタ
H:ホログラム乾板
SP:被測定スピーカ

に有用なものです。

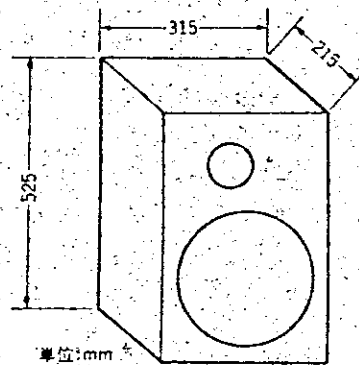
第10図にホログラフィの基本的な測定系を示しています。実際の測定においては、レーザー光としてHe-Neレーザー(波長6328 Å)を使用し、時間平均法で行うのが一般的です。

原理は次の通りです。まず、レーザー発振器からのレーザー光をハーフミラーで2分し、一方は直接乾板に入射させ(参照光といいます)、他方で被測定物の測定面を照射させ、振動面で振幅変調された反射光(物体光といいます)を写真乾板に入射させることにより、参照光と物体光の間で干渉縞を生じさせて、これを写真乾板に記録させます

(これをホログラムといいます)。次にこのホログラムにレーザー光を照射しますと、測定面の振動モードが再現されます。肉眼でつぶさに見ることもできますが、通常これを写真フィルムにおさめて記録します。これは白黒の縞模様として表われ、この縞模様は振動の振幅値を一種の等高線的に表します。

写真-1は、第11図に示すような寸法を有する板厚15mmのキャビネットの側板と裏板のホログラフィ写真を示したものです。写真で示していますように、板面全体の振動姿態がはっきりと観測されます。

写真-1のa~dは側板の振動姿態で、



【第11図】ホログラフィ測定用キャビネット
写真の上方が天板側、右方がパツフル板側です。中央部または下部で振幅が大きく、616Hzまでは全面が一体とな



スピートカ測



スピートカ測



スピートカ測



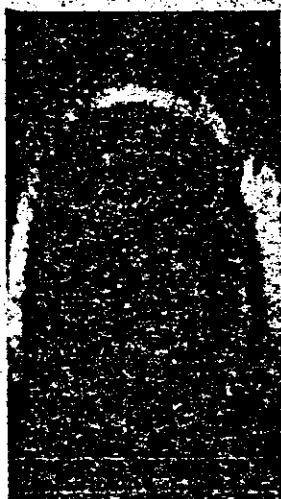
スピートカ測

(a) 左側板 272Hz
入力4V

(b) 左側板 337Hz
入力5V

(c) 左側板 516Hz
入力6V

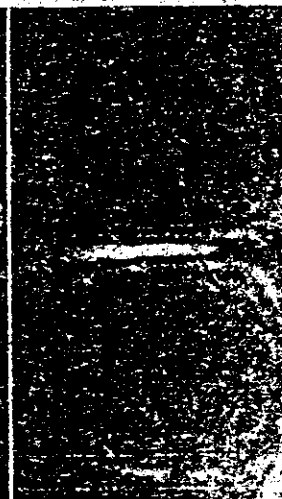
(d) 左側板 616Hz
入力6V



(e) 裏板 299Hz
入力2V



(f) 裏板 362Hz
入力3V



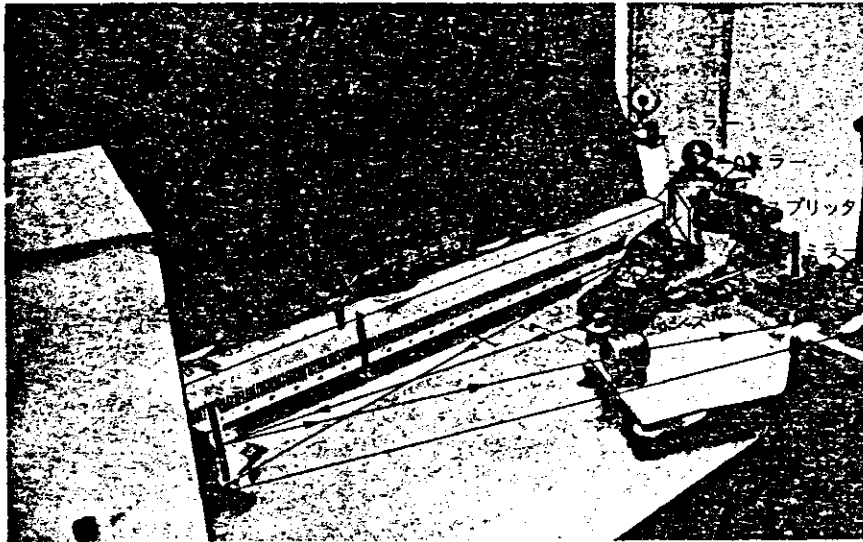
(g) 裏板 535Hz
入力5V



(h) 裏板 572Hz
入力5V

(写真-1) ホログラフィによる写真

スピーカキャビネット



ホログラム鏡板

〈写真-2〉ホログラフィ測定系写真

って振動しています。e~h は裏板の振動状態で、362Hzで上下2分割の分割振動が始まりかけており、また572Hzでは上下方向に3分割の分割振動をしていることがわかります。

このように、レーザーホログラフィを利用することによってスピーカキャビネット板全面の振動モードを観測する

ことができるわけです。しかし、ホログラフィは振幅の状態を示すだけで、位相に関する情報はいっていませんし、キャビネット全面を同時に構造物として測定できないという欠点があります。また、キャビネットが大きくなりますと、それにもなって大きな出力のレーザー発振器が必要となるという

問題点があります(写真-2)。

モーダルアナリシス法による振動モード解析

ここ数年、コンピュータの発達にともない、コンピュータを利用した計測技術が向上し、スピーカに関するもい



〈写真-3〉ホログラフィ測定用機器

いくつかの新しい計測法が開発されています。ここで説明致しますモーダル解析装置も、コンピュータの発達によって可能になったもので、構造物の振動モードを観測できるものです。

この計測装置は高速フーリエ変換波形解析装置を応用したもので、ブラウン管上に立体的なアニメーション表示として、構造物の振動モードを観測でき、各測定面間の位相関係までを含めた全体の動きを立体的に見ることができます。

この装置の原理は次の通りです。まず、駆動点の波形と各測定点での応答波形をこの装置に入力し、駆動点と各測定点間の伝達関数を求め、モーダルアナリシス法による計算を各測定点に対して行ない、モーダルパラメータを計算します。つぎに、このパラメータを計算機で組み立て、振動モードのアニメーション表示を行なうものです。

装置の外観写真を写真-3に示しておきました。

なお、今回測定に使用したスピーカキャビネットは実験用の試作品で、幅は約600mm、高さは約1,000mm、奥行は約430mmのかなり大きなキャビネットです。板厚はバツフル板が25mm、他が20mmとし、補強はいっさい行なっていません。

測定においては、音楽信号の過渡特性に近く、スピーカシステムで再生する全ての周波数成分を均等に含んでいるインパルス信号を、駆動信号として実装したスピーカに加え、各測定点での応答波形を振動ピックアップでとらえ、この駆動信号と応答波形を解析装置の入力データとしました。またスピーカキャビネットをコンクリートの床に10mmのフェルトを敷いた上に置いて測定し、一般家庭での設置条件に近づけました。

各板面の測定点は、バツフル板43点、裏板34点、左右側板と天板がそれぞれ24点の計149点とし、底板を除いた他の5つの板面を個々に独立した測定面としました。なお、この装置に入力できる測定点数は最大150点、分割でき

る測定面数は最大5つですので、この制限内で装置の能力を十分に活用して測定しました。

振動モードを表示する場合には、これら5つの測定面をそれぞれ個別にアニメーション表示することもできますし、各測定面を任意に組合わせて表示することもできます。

次に、少し細かく測定法の手順を説明致します。まず、基本となるXYZの3つの座標軸内に被測定スピーカキャビネットを配置し、それぞれの測定面上の各測定点の座標をXYZ軸に対して決定します。この座標が決定された各測定点に番号を付け(各測定点の単なる名称です)、それぞれの番号の測定点に対してその応答波形(加速度成分)のXYZ方向成分を入力データとしてとり込みます。あとはこの解析装置での処理によって前述のモーダルパラメータが計算され、さらに、このパラメータを計算機(この解析装置に内蔵)で組み立て、それぞれの測定面に関する振動の様子をアニメーション的に表示させるわけです。

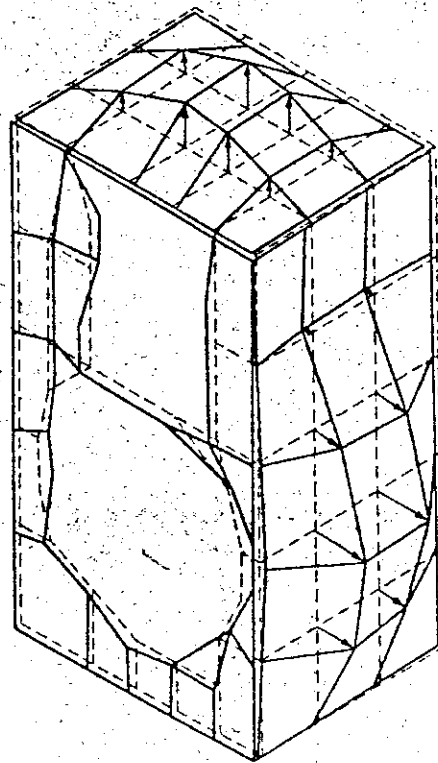
それでは実際に測定した振動モード

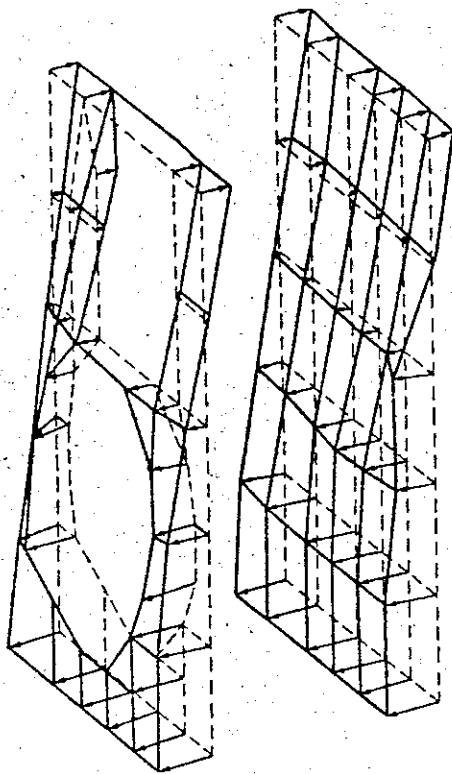
を図示しながら説明しますが、初めに説明致しましたスピーカキャビネット板振動の発生原因として(i)内部音圧に起因するもの、(ii)振動板の反作用による振動が、まずバツフル板に伝達されて生じる板振動の2つがあることを考えながら図を見ていただきたいと思います。

また、前に説明しましたように、実際には振動モードをブラウン管上で、またはそれを8mmフィルム等にとってからアニメーション表示できるわけですが、紙面上での説明ですので、静止状態の図と最大変位状態の図とを比較して、各板面を組合わせた形で行ないます。

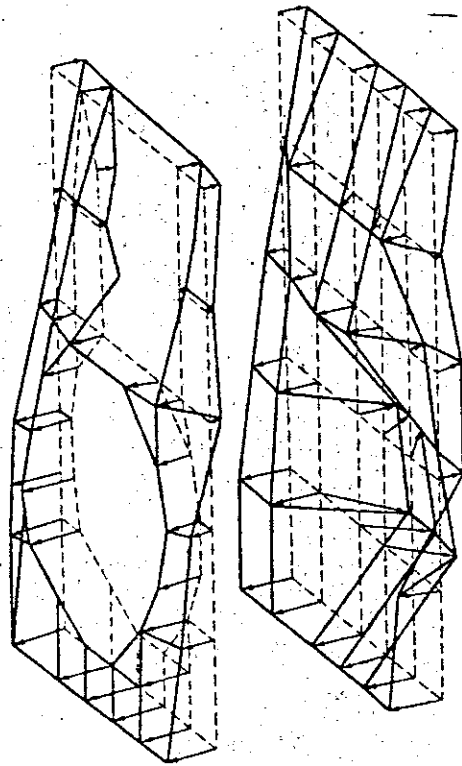
では、1例として288Hzにおける振動モードを第12図に示します。図中の点線は比較のために静止状態を示し、実線は振動モードを示しています。この周波数ではバツフル板の動きは比較的少なく、側板の下方と裏板の中央部が大きな振幅でしかも同位相で振動していることがわかります。この図が示すように、前述のホログラフイによる方法よりははるかに全体像をとらえる

▽▽
〔第12図〕
測定周波数
288Hz
△△





〔第13-1図〕
測定周波数
93 Hz
矢印は振幅の
向きを示す。



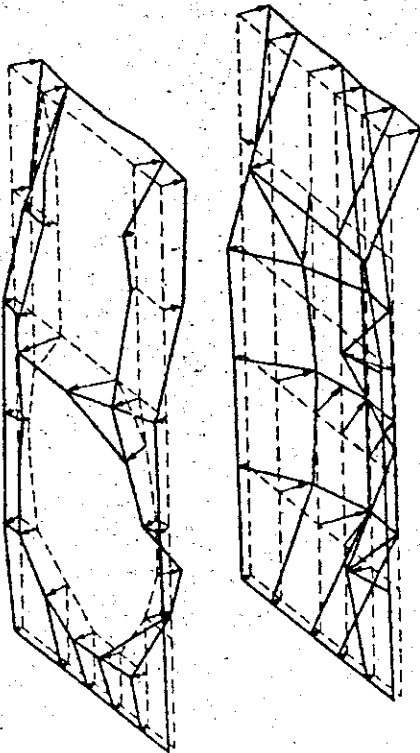
〔第13-2図〕
測定周波数
112 Hz
矢印は振幅の
向きを示す。

のに有利であることがわかります。

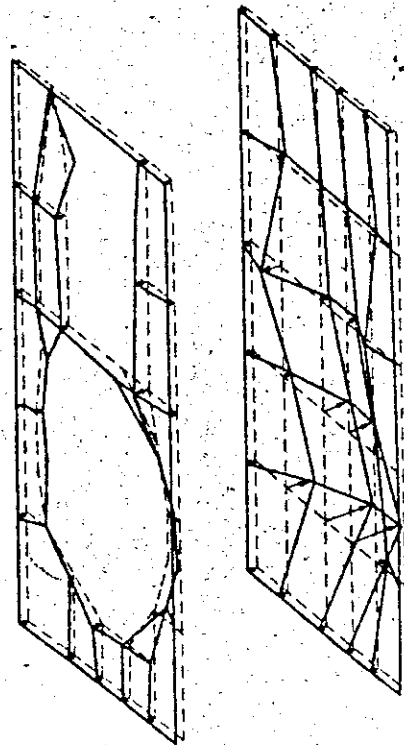
第13-1図～第13-5図はパツフル板と裏板とを対応させて示した、93 Hz、112 Hz、181 Hz、288 Hz、356 Hzで

の振動モードです。図から板面の動きとしては全体的な前後の動きに、各板面独自の振動が重畳された形をしていることがわかつています。

93 Hzではキャビネットが回転運動をし、分割振動は見られません。この回転運動はキャビネットの置き方によってはかなり少なくすることができます



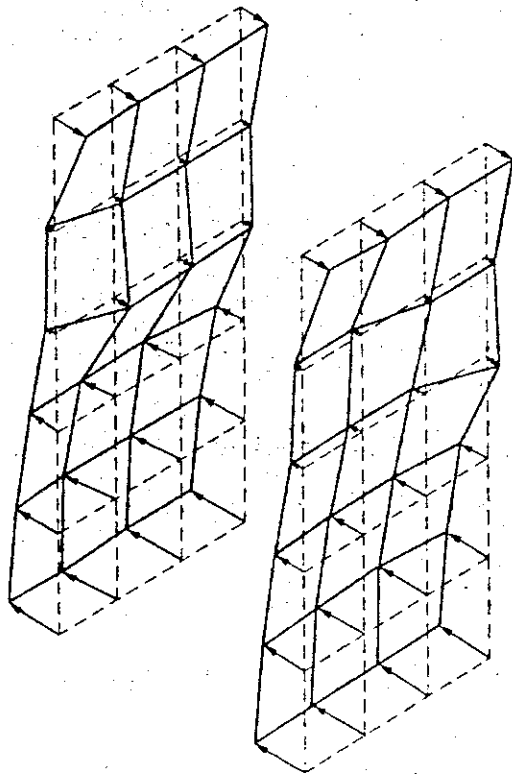
〔第13-3図〕
測定周波数
181 Hz
矢印は振幅の
方向を示す。



〔第13-4図〕
測定周波数
288 Hz
矢印は振幅の
向きを示す。

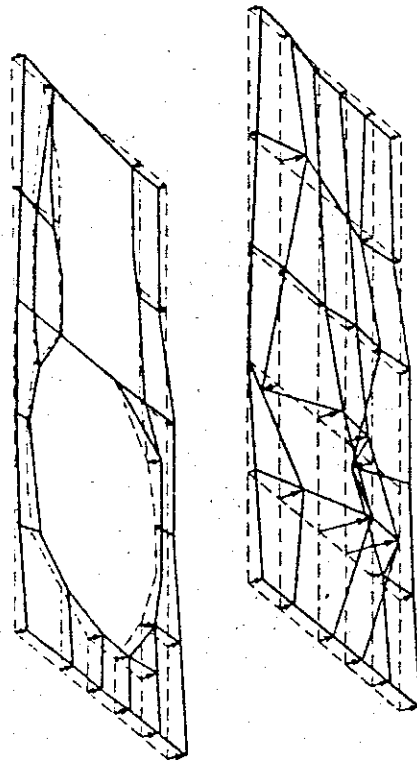
(今回はフェルトの上に置いているために大きい)。112 Hzになるとパッフル板の方から見て裏板下方の右側部が逆位相で振動していて、裏板が振動に対して弱いことがわかります。181 Hzおよび288 Hzでは、裏板の中央部と下方部がパッフル板と逆位相で振動し、振幅もパッフル板に比べて大きくなっています。さらに356 Hzになりますと、裏板がかなり複雑な分割振動をしている様子がわかり、裏板の補強の重要性を示しています。さらに、181 Hz以上では、全体的にみて、各板の周辺部に対して中央部の振幅が大きいことがわかりますので、板面中央部で振幅が大きい箇所と周辺部の振幅が小さい箇所または他の板面の周辺部との間に補強を入れることも効果的だと思います。

第14-1図～第14-5図は左右の側板を対応させて示したものです。93 Hzおよび112 Hzでは、両側板は横方向に回転運動をして同位相で振動していますが、181 Hz以上になると両側板共に下部の振幅が大きくて逆位相となっています。356 Hzになると、上下2分割の振動がはっきりと現われています。



▽ ▽
 【第14-1図】
 測定周波数
 93 Hz
 矢印は振幅の
 向きを示す。

▽ ▽
 【第14-2図】
 測定周波数
 112 Hz
 矢印は振幅の
 向きを示す。

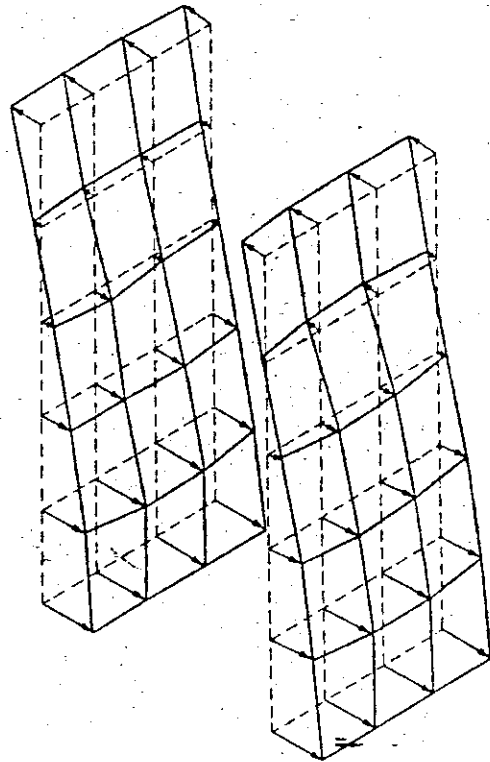


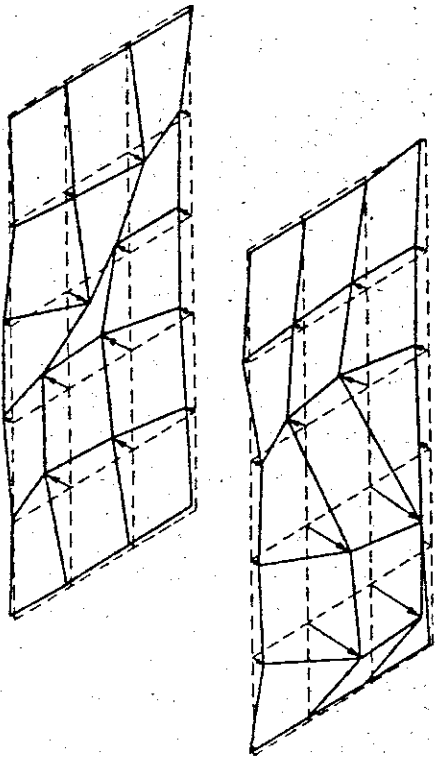
▽ ▽
 【第13-5図】
 測定周波数
 356 Hz
 矢印は振幅の
 向きを示す。
 △ △

さらに振動状態で腹(振幅が大きい所)となる位置が均等に分割されているわけではないので、補強を入れる位置に関しては注意が必要です。

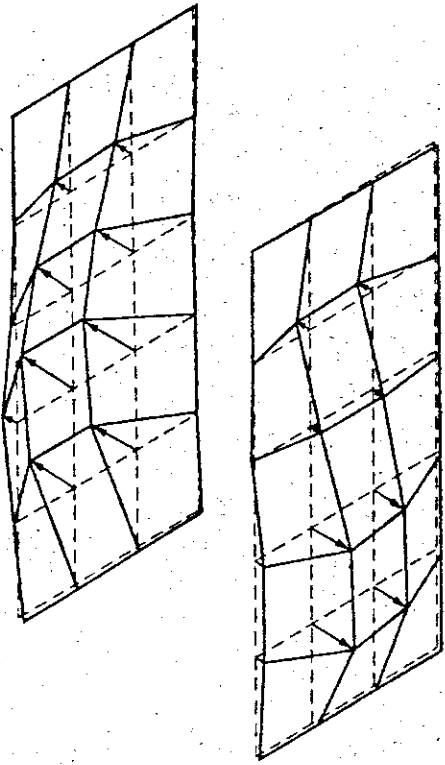
第15-a図、第15-b図は263 Hzでのモードですが、いわゆる呼吸球のような振動をしています。

このモードについて、中立状態から





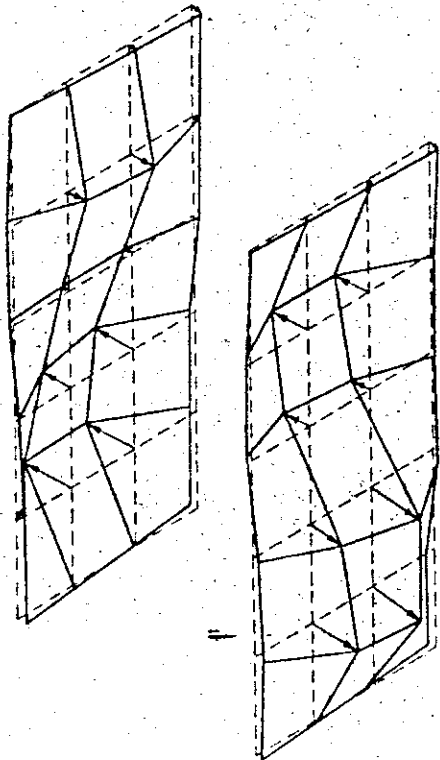
〔第14-3図〕
測定周波数
181 Hz
矢印は振幅の
向きを示す。



〔第14-4図〕
測定周波数
288 Hz
矢印は振幅の
向きを示す。

最大振幅となるまでを段階的に示します。第15-a図はキャビネットの外側方向へ振れを示し、第15-b図は内側方向への振れを示しています。ブラウン管

またはフィルムで映写する場合には、このような変化を連続的に見ることができるとは思います。以上の説明で、モーダルアナリシス



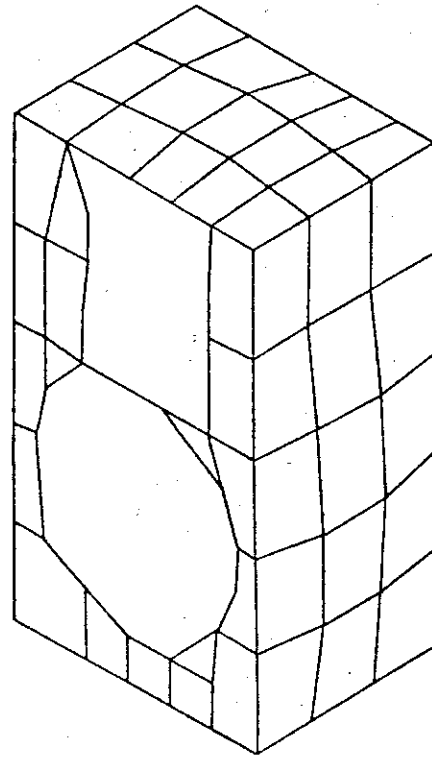
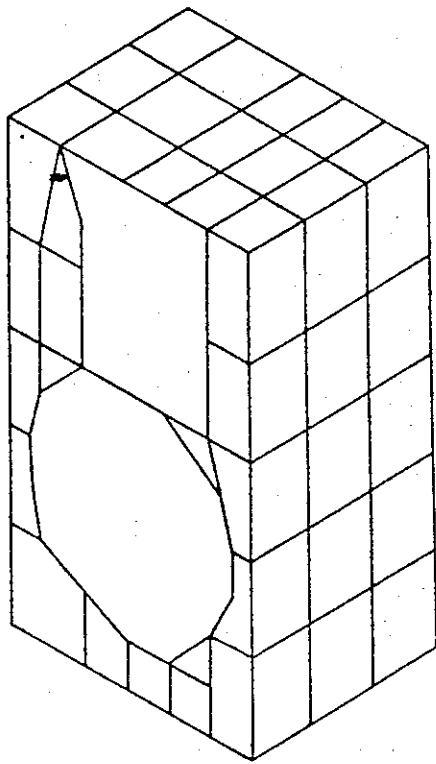
▽ ▽
〔第14-5図〕
測定周波数
356 Hz
矢印は振幅の
向きを示す。
△ △

法の概要がおわかりいただけたと思いますので、まとめて本測定法の2大特長をあげておきたいと思ひます。

- 1) 振動モードを最も自然な形でとらえることができる。低域でのローリング現象や中高音域での分割振動時の位相関係などが一目瞭然である。
- 2) データが全てデジタルで記憶されている。これは従来方法のような特性曲線や写真と異なり、キャビネット全体の振動がいつでもとり出せるように数値化されているので、キャビネット振動と音放射を結びつけることも可能になる。

む す び

以上、スピーカキャビネット用板材料の物性測定法から、キャビネット板振動の測定法、さらにはキャビネットを構造的としてとらえ、キャビネット全体の振動モードを測定する方法としてモーダル解析装置について説明し、実験用のキャビネットで実際にいくつかの振動モードをお見せ致しました。今回のデータは1つのサンプルであ



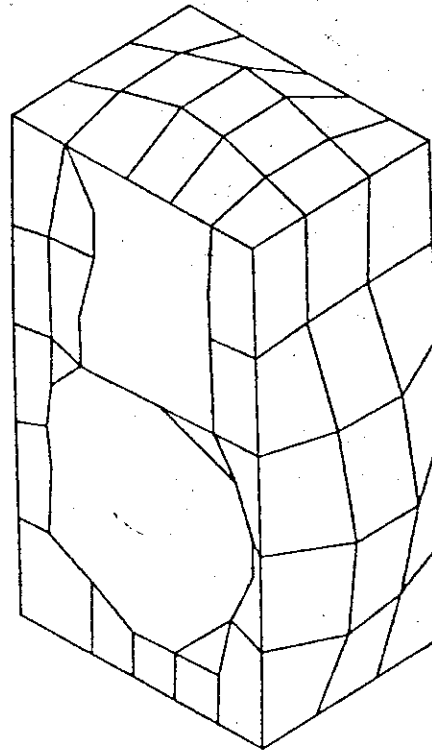
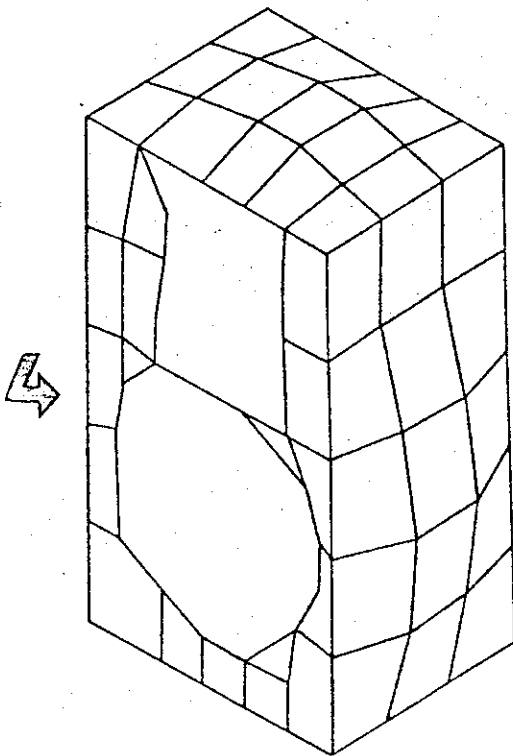
(第15-a図)

りますので、キャビネットの大きさや板厚が異なれば、当然振動モードや板振動の振幅も異なり、また補強板を入れれば、その効果によってさらに異なる

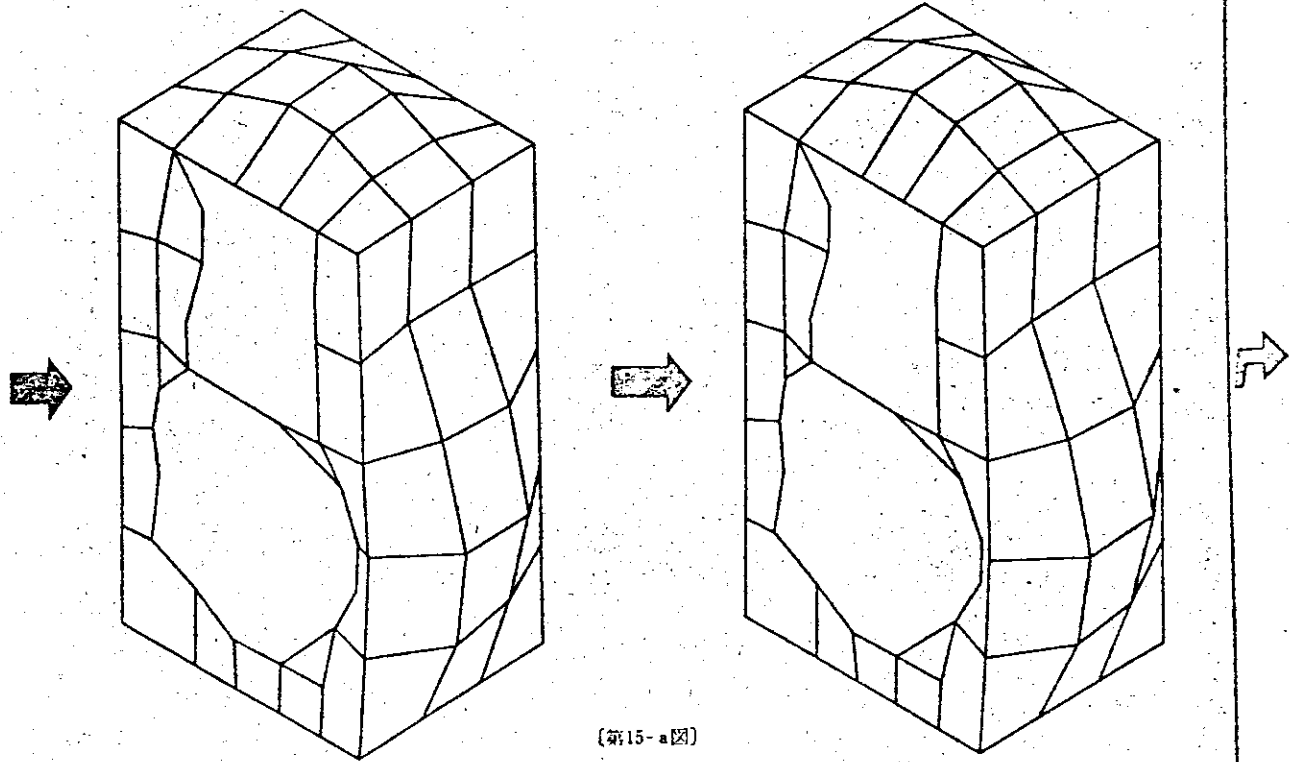
ったデータが得られるわけです。

今後、さらにモデル解析装置を利用することにより、従来の技術では得られなかった多くの情報を活用でき、

スピーカキャビネットの振動解析が進むと思いますし、その成果を設計に役立てることによってキャビネットに関する技術が向上して行くと思われま



(第15-a図)



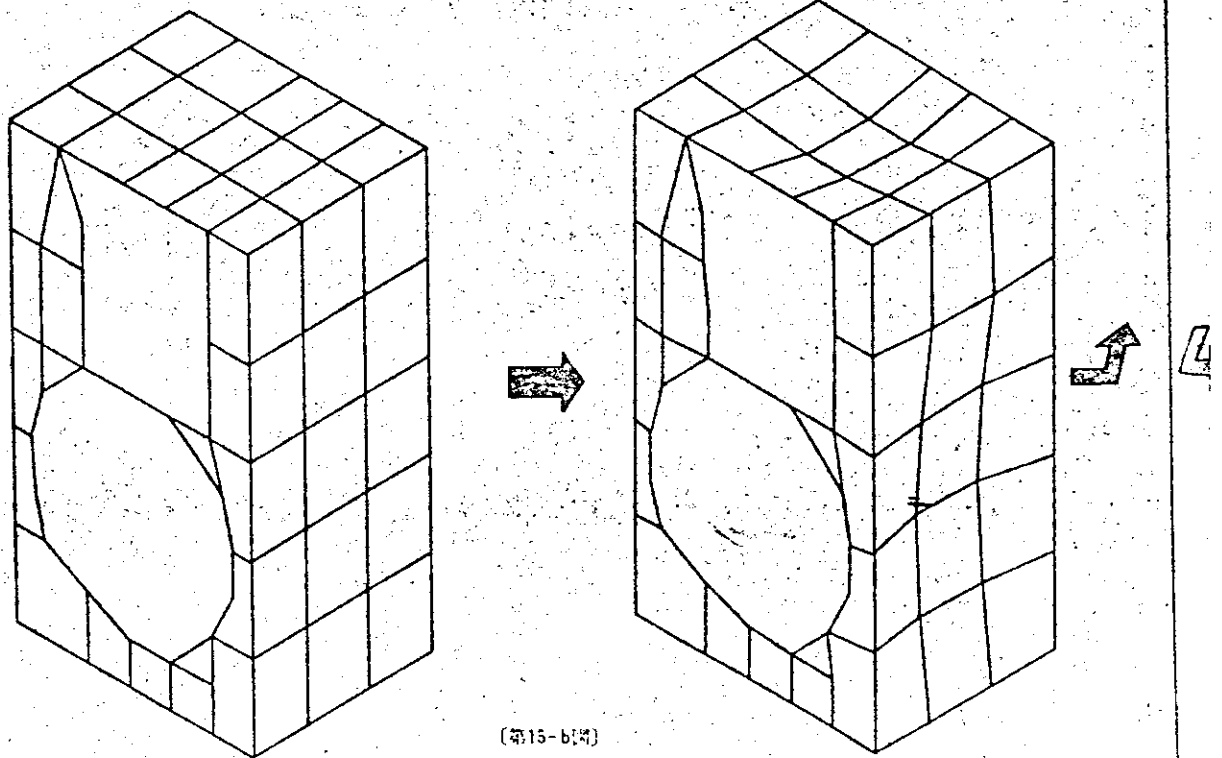
【第15-a図】

また、この方法は単にキャビネットにとどまらず、他の構造物にも当然応用できるものです。

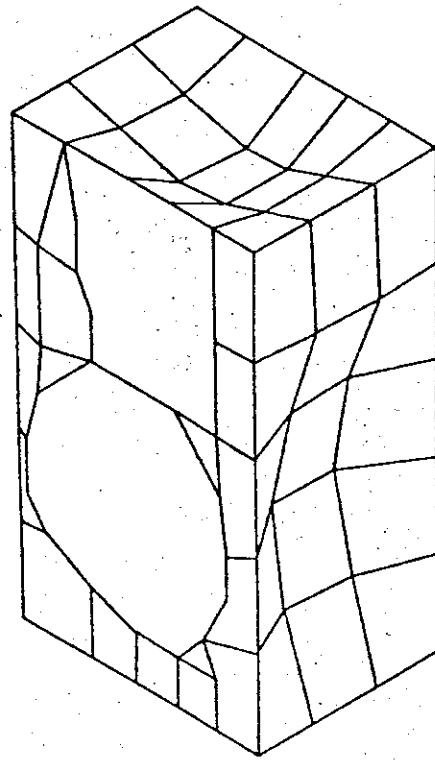
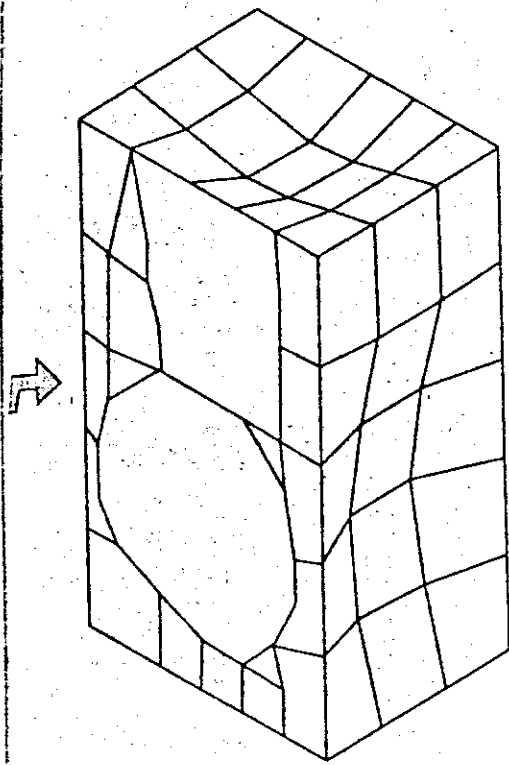
最後に、今回の内容がみなさんのス

ピーカキャビネットに関する考え方に
対して役立つと同時に、疑問点に対す
る1つの解決案となれば幸いです。

(三菱電機株式会社
商品研究所)



【第15-b図】



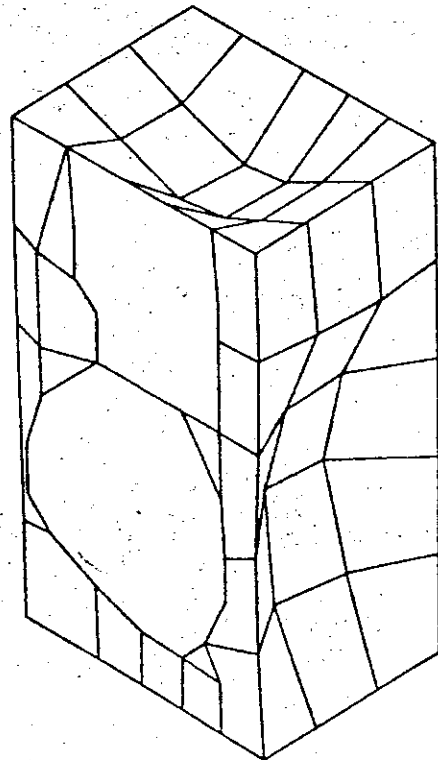
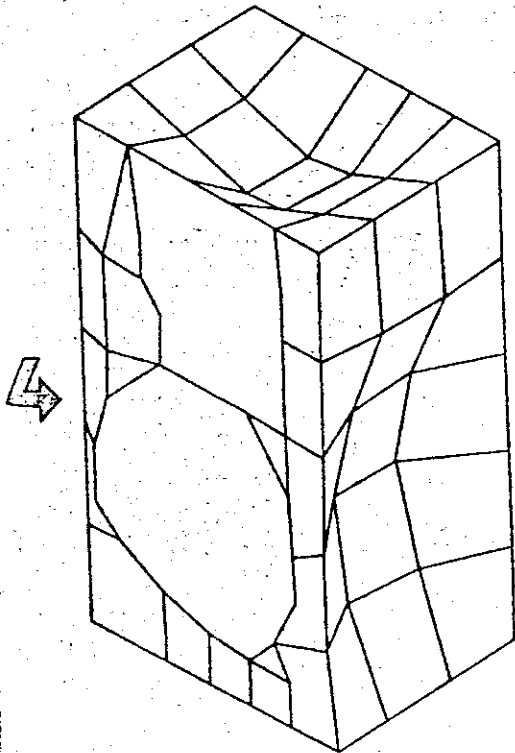
[第15-b图]

参考文献

(1) 電子通信学会技術研究報告
EA 75-14~22

執筆 { 進藤
森田
田中

☆
☆
☆



[第15-b图]