

3.いろいろなスピーカ

(1)大型平面スピーカによる均一で明瞭な拡声

*Theory and Application of Flat Panel Loudspeaker
—Multi-cell dynamic type and Electrostatic type—*

服部 永雄 (Hisao Hattori)

岡崎 正倫 (Masanori Okazaki)

山崎 芳男 (Yoshio Yamasaki)

早稲田大学

(Waseda University)

1. まえがき

新入生を迎えた教室で講義をしていると、何人かの学生が壁や天井を向いて受講している光景に遭遇する。多くの場合律儀な留学生である。彼らは先生の声のする方を向いて聞くという習慣が身についているのである。拡声装置の問題である。遅延装置を使用すれば話者の口元に定位する拡声も可能であるが、多くの教室では増幅器の出力で直接壁や天井に設置されたダイナミックスピーカを駆動しているのが実態である。肉声で講義できる規模、音響設計が理想であろうが、講義科目によっては拡声装置に頼らざるを得ない。少なくとも前方、話者の口元から自然に聞こえるシンプルな拡声装置の実現を目指して、前方に設置する大型平面スピーカを提案してきた。

また生活様式の多様化やネットワークの発達に伴う遠隔講義、会議の増加、学校等のヒアリング試験の公平性の確保など、大空間での均一で明瞭な拡声への要求が高まりつつある。我々はハウリングに強く、均一で明瞭な拡声を行うことができる大型平面スピーカシステムを早稲田大学のほぼすべての中型、大型教室に設置してきた¹⁻²⁾。

2. 平面スピーカの特徴

測定原理等についてはここでは詳しくは触れないが、我々はスキヤニング機能を持つレーザドプラー振動計 (Polytec SVM) を用いて音場の波面を直接観測する手法を提案している。図1にこの方法で観測したパワーモニタースピーカ YAMAHA MSP10 と後述の WASEDA E.E. W-3232 平面スピーカ (30×30cm) で再生した 4 kHz 正弦波の波面を示す。通常の点音源スピーカから出る音は全空間に満遍なく球面波として拡がり、自由空間では距離が2倍になると音圧は1/2に

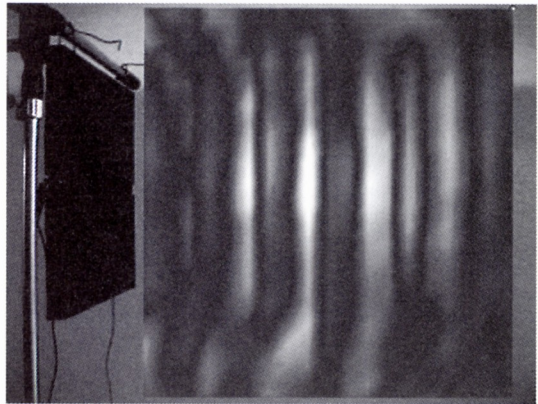
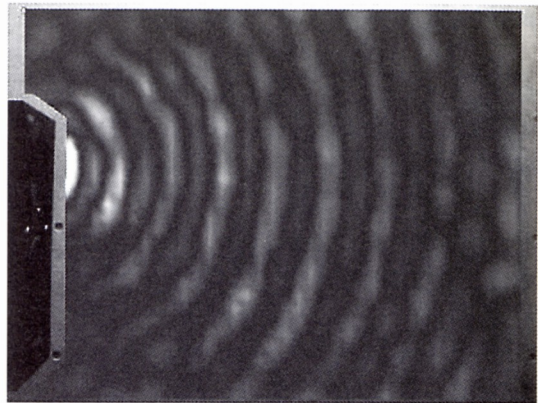


図1 点音源(上 YAMAHA MSP10)と平面音源(下 WASEDA E.E. W-3232)の波面(4 kHz 正弦波)

減衰(-6dB)する。十分長い線音源スピーカから出る音は水平方向には満遍なく拡がり、垂直方向にはほぼ線の幅で進むので、距離が2倍になると $1/\sqrt{2}$ 減衰(-3dB)する。これに対し十分大きな面積を持つ平面スピーカから出た音はその平面の前面のみに進むので、距離による減衰はない。現実には有限の面積の影響によりある程度広がり、指向特性、減衰特性は寸法と波長の関係によって決まる。

図2に30cm角の平面スピーカを40×5個(12m×1.5m)と通常の2ウェイパワードスピーカ YAMAHA MSP10 の正面軸上の距離1, 5, 10, 20, 40mで観測したインパルス応答を示す。平面スピーカではほとんど距離による減衰が無く、40m離れても-4dB程度であるのに対し、点音源に近い通常のスピーカでは距離による減衰と反射音、残響の増加が観測される。

図3にスピーカ前面5mで横方向に正面を離れたときのインパルス応答を示す。平面スピーカは指向性が鋭いので正面をわずかに離れると急激に音圧が減衰す

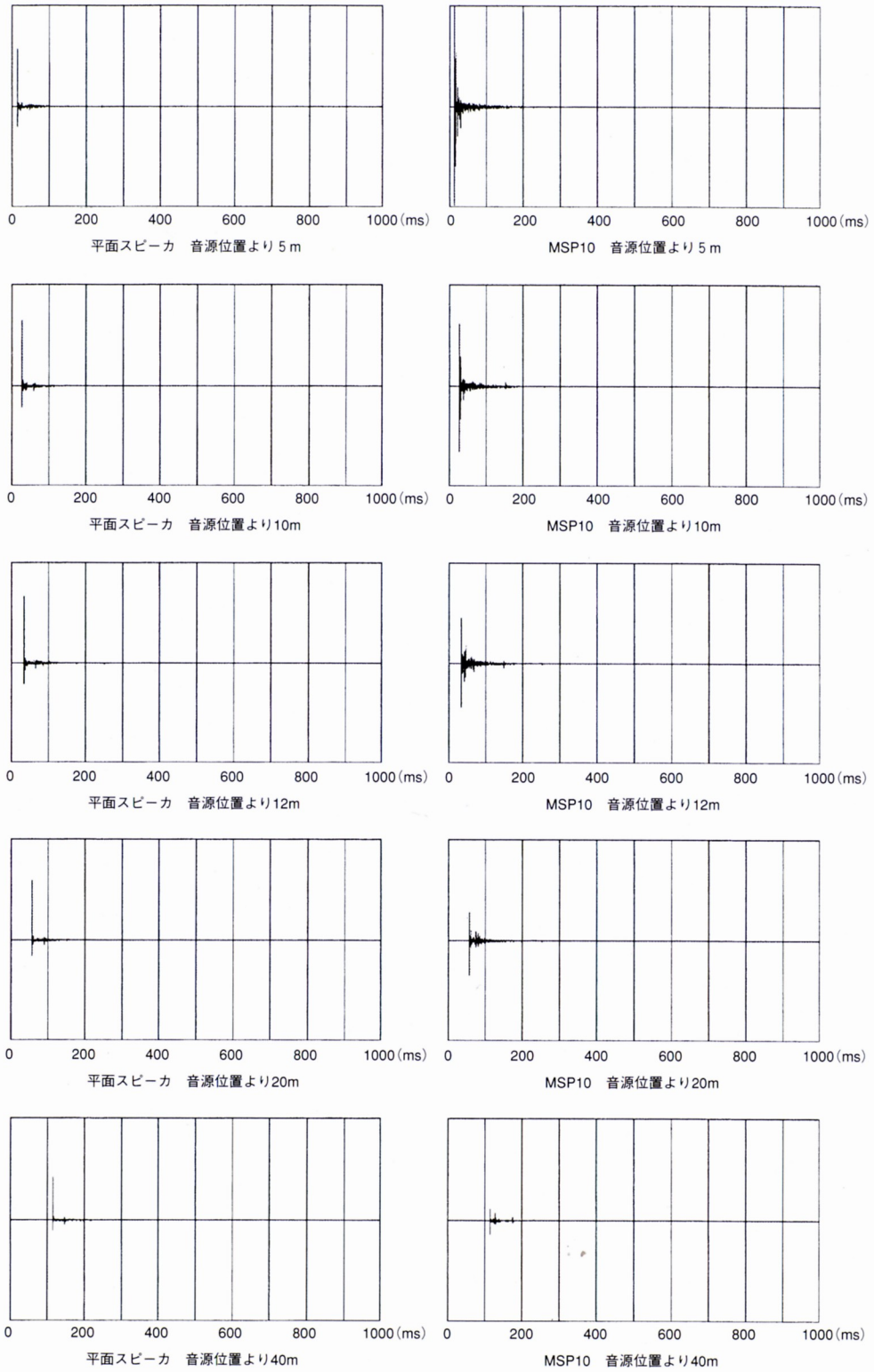


図2 平面スピーカと点音源の距離減衰比較 音源位置より5～40m

3.いろいろなスピーカ(1)

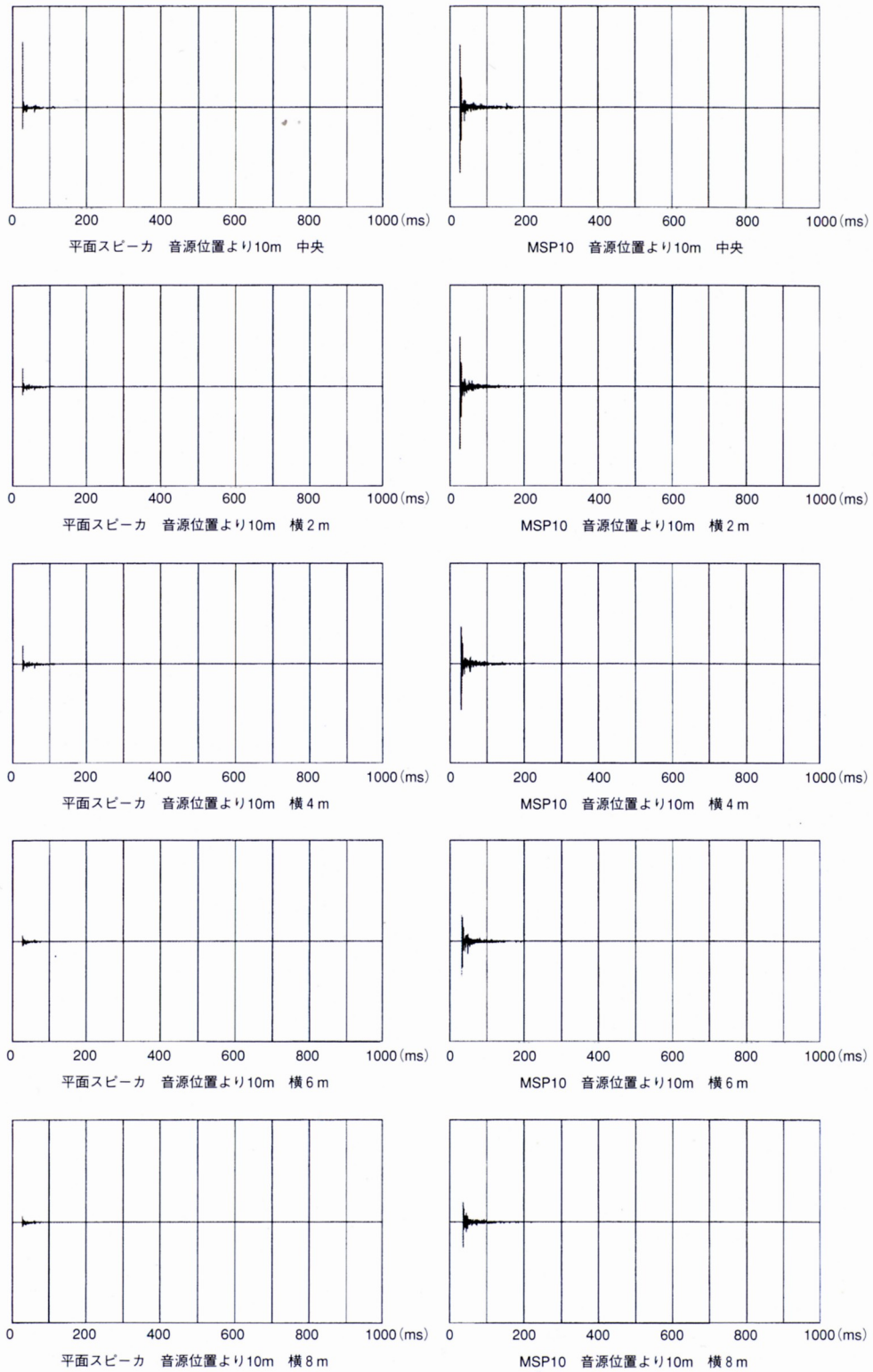


図3 平面スピーカと点音源のオフセット比較

る様子が観察される。一方通常のスピーカは広い指向性を持つので正面からずれても大きく減衰することは無い。

・響きのある空間でも明瞭な拡声 例えば前面にかなり面積のある平面スピーカを設置し、その対向面を吸音することにより、多様な目的をもつ大ホールの音響空間の実現が可能である。たとえば建物自体はそれぞれ目的に応じた響きを与え、演奏等に対する残響を確保した上、拡声音に対する「残響時間」は極力短く設定しアナウンス等の拡声については明瞭な伝達を確保するといったシステムの実現も可能である。

・ハウリングに強い→遠隔講義・会議にも マイクロホンを面上あるいはその延長上に置けば原理的に零点であるのでハウリングは起きない。音源が広いので特定の周波数に帰還のピークが集中せずハウリングに対して非常に強い。実際スクリーンの左右に10×30cmの平板スピーカをそれぞれ24枚設置した早稲田大学の450人教室では通常の拡声状態で、マイクロホンをスピーカ直前に持っていてもハウリングを起こすことが無く、教員に好評を得ている。遠隔講義でもいわゆるエコーキャンセラは不要である。

・静か 前項と同じ理由によるものであるが、部屋全体で十分な音量で拡声している状態で通常のスピーカではスピーカに近づくと音は大きくなりうるさいが、平面スピーカでは近づいても音は大きくならず静かである。これには予想外の効果があり、拡声装置の存在を意識させない上品な空間が実現できる。

・電気音響変換効率が低い 通常のダイナミックスピーカの電気音響変換効率はスピーカの小型化と高出力トランジスタアンプの出現とともに今や1%かそれ以下となってしまう。アンプの効率も高々10%であるから、スピーカを使って音を出すと実に99.9%が熱となって地球を暖めていることになる。これは日本全国ではスピーカだけで小さな発電所に匹敵するエネルギーを無駄遣いしていることになる。

スピーカの電気音響変換効率は振動板の面積を大きくすると上昇する。面積の大きい平面スピーカはダイナミック型でも、スピーカ単体の変換効率を10%の程度にすることが可能である。後述のコンデンサスピーカとスイッチングアンプを組み合わせることにより、実験室では増幅器も含めて30%程度の変換効率を得られている。

・屋外での必要な領域への拡声 指向性の鋭さを生か

して必要な領域のみをサービスエリアとした拡声を行うことにより余計なエネルギーを必要としない拡声システムが構成できる。

・残響付加、サラウンド用スピーカとして 客席部壁面を吸音し、背後にN個の平面スピーカとM個のマイクロホンを設置してそれぞれのマイクロホンからスピーカへの実空間(大ホール音楽仕様)インパルス応答の実時間畳み込み演算を行う装置を備えると、平面スピーカの面上にマイクロホンを配置することにより音響帰還は原理的に生じない。通常の点音源スピーカと違って壁面近くでも残響付加音源の存在を感じさせないという特徴を持つ。

3. 平面スピーカの構成

3.1 マルチセル型ダイナミック平面スピーカ

平面スピーカとしては広く使われているコーン型ダイナミックスピーカのコーンに平面振動板を一体化した簡易型、平面振動板の固有振動モードの節を複数(実用化されたものは4個程度)のボイスコイルで駆動するダイナミック型、古くから一部で使われていたコンデンサ型などが知られている。

我々が早稲田大学の大型教室に1998年導入した平面スピーカは早稲田大学音響研究室で設計し、製作は(株)ソニックウィンドウ(現(株)エフ・ピー・エス)に依頼した。1cm間隔で10×30、計300個の10ターンのボイスコイルを両面に印刷したフレキシブルプリント基板を振動板とし、5×5mm、厚さ3mmの都合300個のネオジウム磁石を150個ずつ互い違いにボイスコイル対応する位置に固定した2枚の穴あきヨーク(間隔10mm)の間に置いた構造のマルチセル・ダイナミック型である(FPS1030、図4)。エッジは固定せずフリーエッジとし、振動板は25g/m²のエステルウールを2枚前後のヨークとの間に挿入して支持している。ボイスコイルの間隔は可聴帯域全域にわたるピストン運動を目指して、空気中での20kHzの音波の波長が1.7cmであることを考慮して1cmとした。

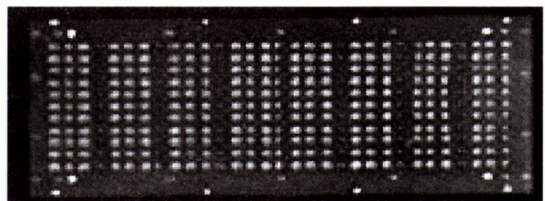


図4 マルチセル・ダイナミック型(FPS1030)

3.いろいろなスピーカ(1)

その後ボイスコイルの間隔を8mmとさらに短くし、振動板を $20\mu\text{m}$ と薄くしアルミの1ターンボイスコイルを蒸着した 32×32 , 1024ボイスコイルの $30\times 30\text{cm}$ のダイナミック型も使用している(図5)。

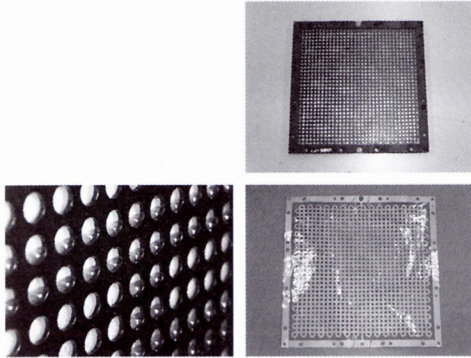


図5 1024ボイスコイルの $30\times 30\text{cm}$ のダイナミック型 (WASEDA EE W-3232)

3.2 コンデンサスピーカ

前述のマルチセル型ダイナミック平面スピーカは振動板全面に駆動力が加わり、ほぼ可聴周波数全域にわたりピストン運動が確保できるので複数枚用いることにより平面波音場を作ることができるが、スピーカ単体が重くて高価にならざるを得ない。最近では構造が簡単で原理的に変換効率の高いコンデンサスピーカと1ビットアンプを組み合わせた省エネルギーかつ安価なシステムを提案し、一部の教室や会議室に導入している。

コンデンサスピーカは図6のように空隙を隔てて向かい合った平行平面電極の間にバイアス電圧を加え、それに入力信号を重ね合わせて電極間の吸引力を変化させる。可動電極に働く吸引力の変化分 f [N]は電極(振動板)面積 S [m^2], 電極間隔 g [m], バイアス電圧 E [V], 入力信号 e [V], 真空誘電率 ϵ_0 [F/m]とすると

$$f \approx \frac{\epsilon_0 S E}{g^2} e = \frac{C E}{g} e = K e \dots\dots\dots (1)$$

となる³⁾。Cは電極間静電容量、Kは力係数である。すなわち吸引力は電極面積、バイアス電圧に比例し、電極間隔の二乗に反比例する。

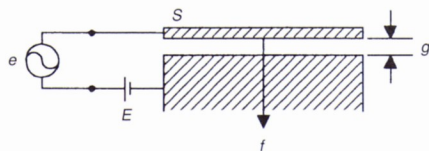


図6 コンデンサスピーカの原理

試作したコンデンサスピーカは図7のようなプッシュプル方式で、外観を図8に示す。

最近はこの $30\times 30\text{cm}$, $60\times 60\text{cm}$ のもの他 $1\times 2\text{m}$ の大型平面スピーカも試作している。振動板は膜あるいは板の固有振動の影響を軽減すべく、ポリエステルにアルミを蒸着した $50\mu\text{m}$ 厚のもの、その前後にバルサ板を貼り付けたもの、アルミを蒸着した $6\mu\text{m}$ のポリエステルフィルムを用いた。同一駆動条件でバルサ

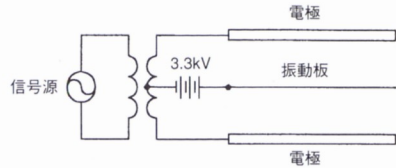
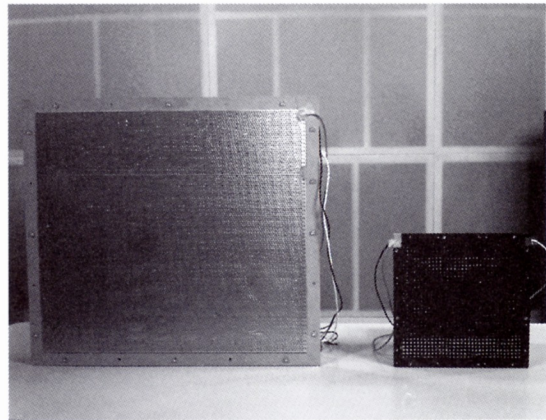
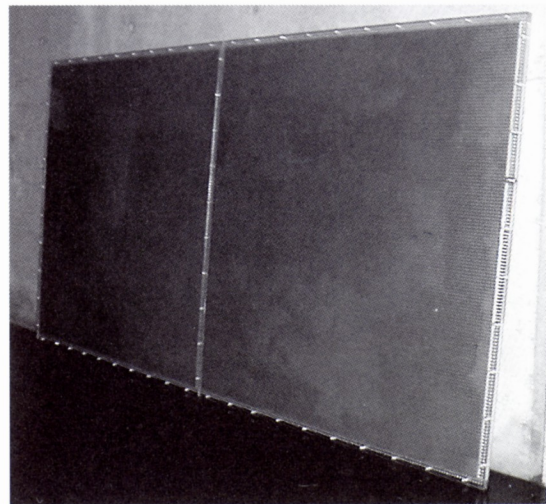


図7 プッシュプル型コンデンサスピーカ



(a) $60\times 60\text{cm}$ $30\times 30\text{cm}$



(b) $1\times 2\text{m}$

図8 試作したコンデンサスピーカ

振動板を用いたものに対し厚膜フィルムを用いたものは8 dB程度、薄膜フィルムを用いたものは14dBほど高い音圧が得られた。また薄膜フィルムをフレームに張らずにフリーエッジとしてエステルウールで支持したものはほぼ全帯域に渡り特定のモードがたつことも無くピストン運動をする上、さらに8 dBほど高い音圧が得られ、フレームで支持した厚膜フィルム構造と比較して15dB、バルサ材に対して実に23dBも高い音圧が得られた。

3.3 変換効率

コンデンサスピーカは一般には変換効率が悪いと言

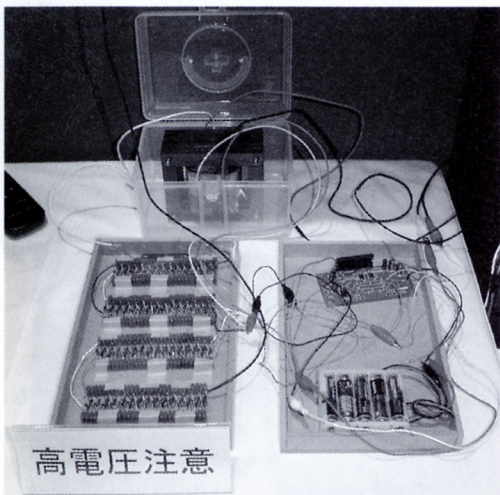


図9 コンデンサスピーカ駆動回路

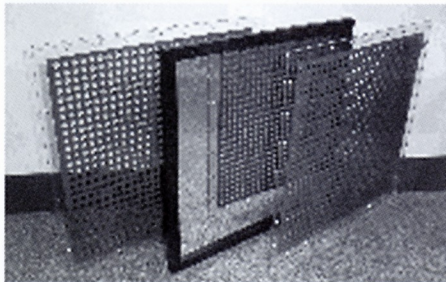
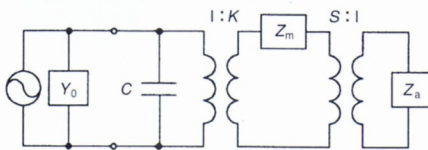


図10 コンデンサスピーカの構造



Y_0 : 電源内部アドミタンス
 Z_m : 機械インピーダンス Z_a : 音響インピーダンス

図11 コンデンサスピーカの等価回路

われている。しかし図11に示す等価回路からもわかるように、ボイスコイルの直流抵抗成分が無く、超伝導状態のダイナミックスピーカ⁴⁾と等価であるから原理的に変換効率が高いはずである。

図12に示す回路で60×60cmのコンデンサスピーカに流れる電流と電圧、 $I(t)$ 、 $v(t)$ を観測して、コンデンサスピーカ自体の有効(消費)電力 $P[W]$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \dots\dots\dots(2)$$

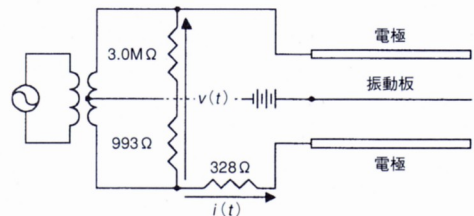
を求めたところ、ギャップ長それぞれ8 mm、成極電圧3.3kVとし、6 Vの1ビットスイッチングアンプで1:400のトランスを介して400Hzの正弦波を供給したところ、 P は15mW、音響出力は約1.5mWであった。すなわちおよそ10%の電気音響変換効率を得られたことになる、1×2 mの大型では実に30%近い変換効率を得られた。

一般にコンデンサスピーカの効率が悪いといわれる所以は増幅器の構成にある。すなわち広く使われている半導体アナログアンプは多量の負帰還により見かけ上の出力インピーダンスは低いものの、無効電力もアンプ内部で消費されてしまうからである。したがってコンデンサスピーカを1ビットアンプやPWM等の1ビットスイッチングアンプで駆動することにより驚くほど高い電気音響変換効率を得られる⁵⁾。

4. 応用例

4.1 平面スピーカ付教卓

1998年新築された早稲田大学14号館大型教室用に平面スピーカを前面と側面に6枚組み込んだ教卓(図13)と、パネルディスカッション用のスタンドアロン型机



(a)消費電力測定系



(b)電流と電圧

図12 コンデンサスピーカに流れる電流と電圧

3. いろいろなスピーカ(1)

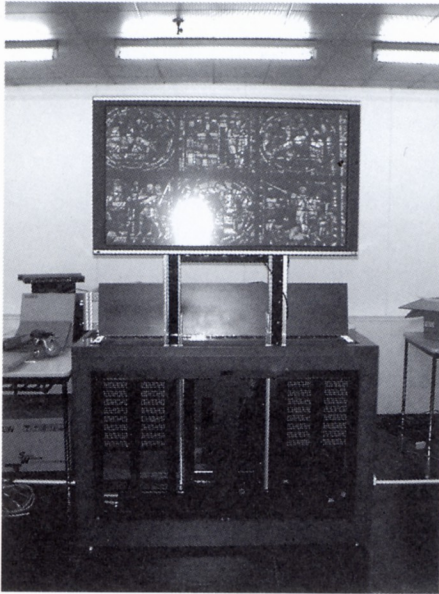


図13 平面スピーカを組み込んだ教卓

を導入した。

4.2 階段教室

1999年早稲田大学理工学部57号館201, 202階段教室(450人)改築に伴い大型スクリーン両側に12枚ずつ設置した。教室内の拡声ばかりでなく、慶応大学との間で毎週行われていた遠隔講義にも使用したが、慶応大学の担当者から早稲田大学では新しいエコーキャンセラを導入したのかと問い合わせが来るほどハウリングに強くなり、円滑なコミュニケーションが図れるようになった(図14)。

4.3 広島大学サタケメモリアルホール

別項「サタケメモリアルホールの音響設計」として紹

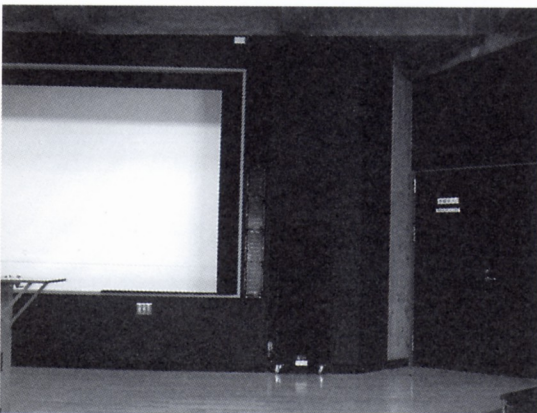


図14 早稲田大学理工学部57号館教室

介されている広島大学最上キャンパスに新築された多様空間、サタケメモリアルホールへ導入された⁶⁾。

4.4 早稲田大学本庄キャンパス

2004年竣工した早稲田大学本庄キャンパスコミュニケーションセンター内の2つの階段教室にも(株)プロトロ製平面スピーカがそれぞれ8, 10枚導入されている(図15)。

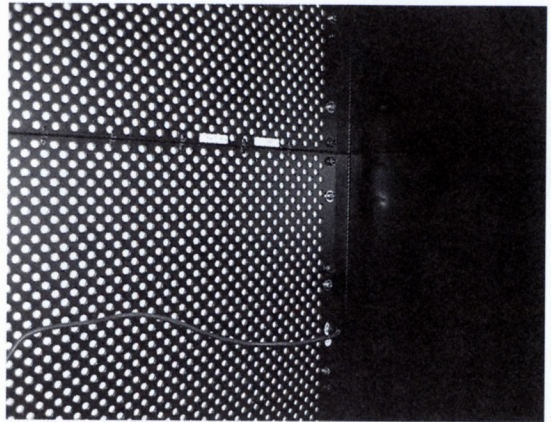


図15 早稲田大学本庄教室の平面スピーカ

5. むすび

以上大型平面スピーカの導入により、意匠的にも目障りになることなく、均一で明瞭な拡声が可能であることを示した。またホール等では目的に応じた響きを得つつ、アナウンス放送等は明瞭に伝えることのできるシステムを紹介した。

特別なエコーキャンセラ等を用いなくともハウリングに悩ませられることのない遠隔会議、講義システムへの導入例、野外拡声の可能性についても言及した。

さらにコンデンサスピーカと1ビットアンプを組み合わせるにより高効率遠隔講義・会議システムが実現可能であることを示した。

[参考文献]

- 1) 田中巧, 小野政一郎, 及川靖広, 山崎芳男: マルチセル平面スピーカを使った教室の拡声システム. 音講論集, pp.815-816 (1999.9).
- 2) 渡辺隆行, 岸永伸二, 川上福司, 山崎芳男: 大空間におけるマルチセル平面スピーカの基本特性. 音講論集, pp.983-984 (2002.9).
- 3) 西巻正朗: 改版 電気音響振動学 (コロナ社, 東京, 1978).
- 4) 須田誠, 中沢誠, 山崎芳男: 電力の供給を必要としない高能率伝声器の構成. 音講論集, pp.553-554 (2002.3).
- 5) 岡崎正倫, 及川靖広, 山崎芳男: コンデンサスピーカを用いた遠隔講義・会議システム. 音講論集, pp.553-554 (2003.9).
- 6) 増田潔, 山崎芳男: サタケメモリアルホールの音響設計. 音響技術 No.125, pp.67-71 (2004.4)