

【連載：Who's Who ～オーディオのレジェンド～ 第3回】

ダイヤトーンに生きる（その2）

佐伯 多門

前回に続いて「ダイヤトーンに生きる」の続編その2の「ダイヤトーン・スピーカーの研究開発の継続的挑戦」について述べます。

[1] 音響研究開発への取り組み

オーディオ事業の発展が予測される中、会社は兵庫県の工場から福島県の郡山の工場にオーディオ関係の事業を集結することになり、1967年に私も転勤で始めて東北の土地に赴任して仕事を開始しました。

既にオーディオメーカー各社は1964年頃から音響研究を秘かに検討していました。中でも、日立製作所¹⁾や、東芝²⁾では音質評価の研究の取り組みとして、音の因子と音響機器の開発を結びつけようと大規模の研究を行なうなど注目されました。

こうした中、我が社の上層部からは「ダイヤトーンはこれまで先輩の皆さんが積み上げてきた技術遺産を食い潰すことなく、新しい研究開発ができるのか」と檄が飛びました。私はこれからの先行きを思うと現状の体制に対し危機感がありました。また同時に研究開発で負けてはいけないと思う焦燥感が生まれました。そして、どんな取り組みで研究開発を行えばダイヤトーン・スピーカーの開発技術が進展できるのか、規模や人材の確保など色々な課題が生じてその戦略に苦しめられました。

色々の提案が噴出した中で、相談した技術部長の諏訪寧から「スピーカーを原点から見直す必要がある」との提案があり、私もこれに賛同してスピーカーの基礎から見直して新時代の高品位再生用スピーカーを開発する研究開発に取り組むことにしました。丁度新製品 DS-251 型がヒットしてスピーカー事業が好転する兆しが見えた、1969年になって会社組織として商品研究所の中に音響研究部を設立し、ここに優秀な人材を集結することができました。

[2] スピーカー振動板の振動状態の可視化

最初の課題は高音用スピーカーの特性を改善するため、これまで特性を測定して可否を決めるだけであったものを、もう一步踏み込んで振動板がどのように振動して悪くなっているのか、私はその実態を知ることができないかという素朴なテーマを課題にして研究を開始しました。

コーン振動板が高音域で分割振動しているということは教科書などに記載されていますが、それがどのように動いているのか、それを目で見れば新しい改善の手が打てるのではないかと考えました。

これは本当に基礎から見直しする糸口としての研究課題と思いましたが、非接触でこれを見ることができる方法はあるのか、これまでのクセノンランプの放電によるストロボスコープで低い周波数での動きしか観測できない現状のなかで、これを打破して可能性が生まれるのか心配でした。

三菱電機の中央研究所には色々な分野のエキスパートの研究者が居るので、この問題に絞って相談してみました。その結果、1971年にレーザーホログラムによる振動板の振動状態を観測できる研究成果が得られ、写真-1のような高音用スピーカー振動板の分割振動域の状態が観測でき、振幅値の違いや節の状態も一目瞭然となり、その上各周波数で変化していく様子を写真で見ることができるようになりました。³⁾

この振動状態の観測がきっかけとなり、幸いにも次の課題の発見ができました。

これは今までスピーカーのピストン振動域は、振動板の有効径の寸法の約2倍の波長となる周波数までピストン振動領域であると教科書に書かれていました。しかし低音用スピーカーの振動状態をレーザーホログラムで観測して見ると、もっと低い周波数から非軸対称モードの振動が発生するものが何種類もあり、振動板に違いがあることを発見しました。この違いは何なのか、これを究明する手段を見付けるための新しい課題が生まれ、ついにコーン振動板の振動理論解析をする必要に迫られました。

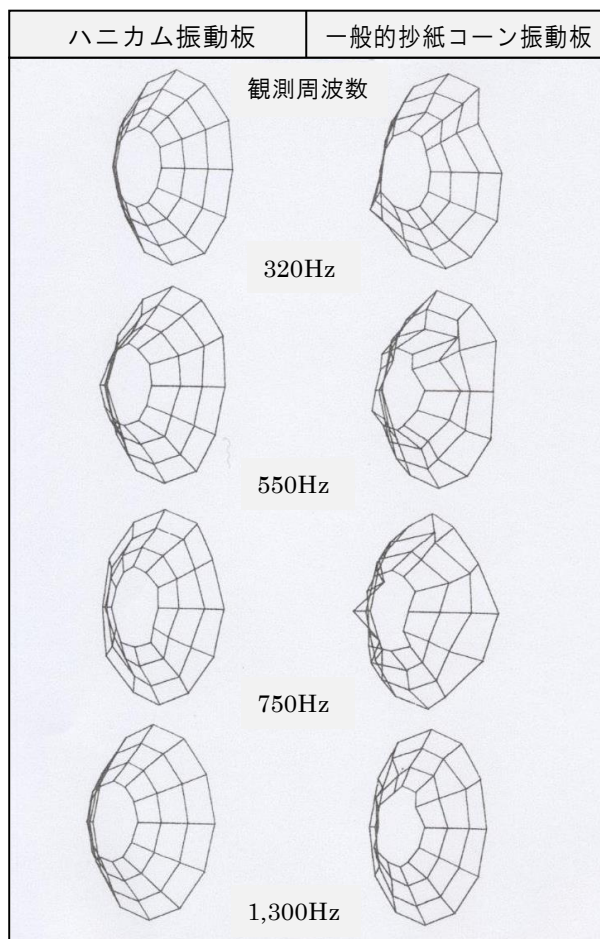
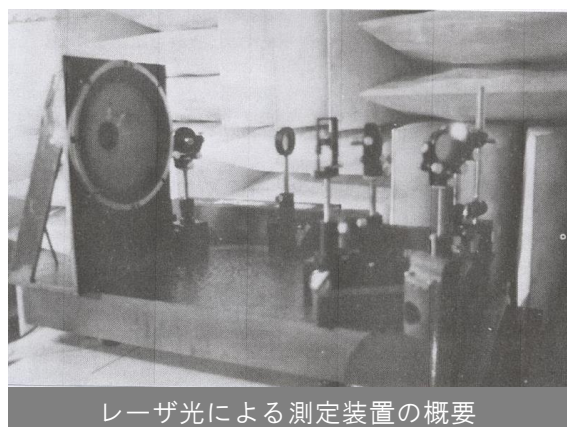
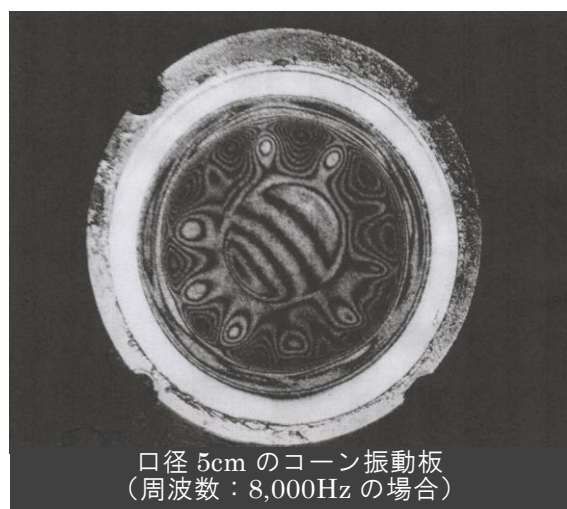


写真-1：レーザーホログラフィによる高音用スピーカーの振動姿態とその光学系測定装置

図-1：モーダル解析で観測周波数の違いによるコーン型振動板の振動姿態の比較例（口径 30 cm）

[3] 理論解析とその裏付けによる新素材の開発

この課題は早速、理論解析の専門家たちが取り組む、最新の有限要素法による解析を進めました。そして1976年からその成果が次々と得られ、軸対称振動になる固有振動数、振動モードなどを求める実験式まで出来上がり、ピストン振動域の拡大を検討できました。^{4), 5)}

一方、米国のNASAで宇宙ロケットの地上シミュレーションとしてK-1ロケット筐体の振動解析に「モーダル解析」が使われていることを知り、この手法をスピーカーに応用できないか検討が行われました。その結果、1978年に初めてコーン振動板の振動状態を3次元のスローモーション映像として観測できるようになり、先の課題であった非軸対称モードや軸対称モードの状況を、目で確認できるようになりました。(図-1)

これはレーザーホログラムによる観測と比較すると、軸対称振動の観測では手数が少なく早く問題点を抽出ができ、非常に役立つことがわかりました。そして、理論解析による成果と付き合わせて見当ができるようになり、ここに初めてピストン領域の拡大と低ひずみ化のために振動板の剛性を高める必要があることを導きだしました。

このため物性を研究する研究者と共にコーン紙の物性を研究し、紙原料から振動板の紙の漉き上げなどのプロセスを1つ1つ検討し、剛性の高い振動板材料とその製法を探求しました。しかし、紙による高剛性化の範囲は限定され、どうしても特定の範囲から逸脱する方法が無いと結論して、これに勝る振動板材料を新たに研究する必要に迫られました。(図-2)

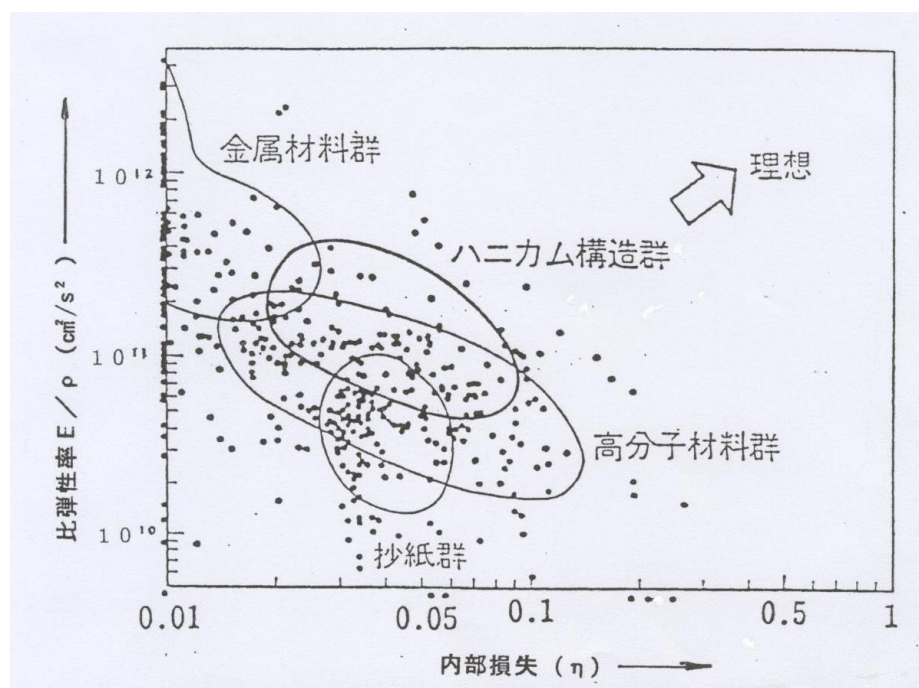


図-2：理想のスピーカー振動板を求める比弾性率と内部損失の関係およびその素材群の傾向

この課題に対し、社内で宇宙開発に使用する軽量かつ高剛性のパラボラアンテナのハニカムサンドイッチの素材をスピーカー振動板に応用すれば良いのではないかと提案がありました。我が社にはロケットの発射時の大音響や振動に耐え、宇宙の真空状態にも耐える加工のノウハウがあり、スピーカー振動板が空気負荷に耐えて振動できる剛性と、完成した振動板素材が軽量であ

ることから、求めるスペックに適合していることがわかり、専門家の支援を得て早速研究を開始しました。

しかし、私にはこの材料を使った低音用スピーカーを作るには最初かなり抵抗がありました。将来的に成功するだろうかとの不安があり、紙からハニカムへの決断には勇気がいりました。

幸い、我が社では 1973 年頃からデジタルオーディオの研究が行なわれ、もうすぐそこにデジタル・オーディオ時代が見え、超低音域まで再生できることが明白になっていたのも、この再生には剛性の高い振動板が最適であると判断しました。

そして 1980 年、デジタル時代のダイアトーンスピーカーは「紙離れ」を宣言して、ハニカムサンドイッチ・コーンを改善しながら順次搭載していくことにしました。

【4】デジタル・オーディオ時代への取り組みの提案

三菱電機ではデジタルオーディオ録音機の研究から、1979 年に固定ヘッド方式を発表しました。この間に音の素材を色々とデジタル録音し、これをプレイバックしてその素材音を完全に再生できる検討を行ないました。そして、最初のデモストレーション用スピーカーには超低音の 20Hz から再生できる超広帯域の 4S-4002 型スピーカーシステムを開発し、デジタル音を十分に再生できました。米国の AES での発表では参画した関係者から高い評価を得ました。

世間ではアナログ・ディスクからデジタル・ディスクになると、ダイナミックレンジが拡大するため大きい音を十分に再生できる耐入力の上が必要条件とされていました。しかし私は、色々のデジタル録音に立会い再生音を聴くと、むしろ非常に微小な音まで再生しなければならないことに気づきました。(写真-2)

これを 1980 年 10 月の電子工業技術大会で「音響部品面でのデジタル対応策」⁶⁾と題して私が講演し、スピーカーにおけるデジタル対応策で最

も重要なのはスピーカー動作特性の小レベルでの直線性であり、これまでアナログソフトの雑音で消されていたのが、デジタル再生では小レベルの信号が分解能高く再生できるため、この点を重視する必要があることを強調しました。そして聴講者から多くの賛同を頂きました。(図-3)

ダイアトーンではデジタル・オーディオ再生に「高剛性思想」を打ち出すと共に、微小信号の再生のため半田付けから圧着接続することや、スイッチの接点数を削除するなど電流回路の再点検をして、その成果を製品として市場に送り出しました。

また、高音部の振動板に超硬質のボロンを採用し、ボイスコイルを直接巻きつけて駆動ロスを低減させる DUD 方式の振動部を開発するなどして、繊細でシリアスな高音部の再現に成功しました。



写真-2：1980 年頃デジタル録音をプレイバックして音質を確認する筆者

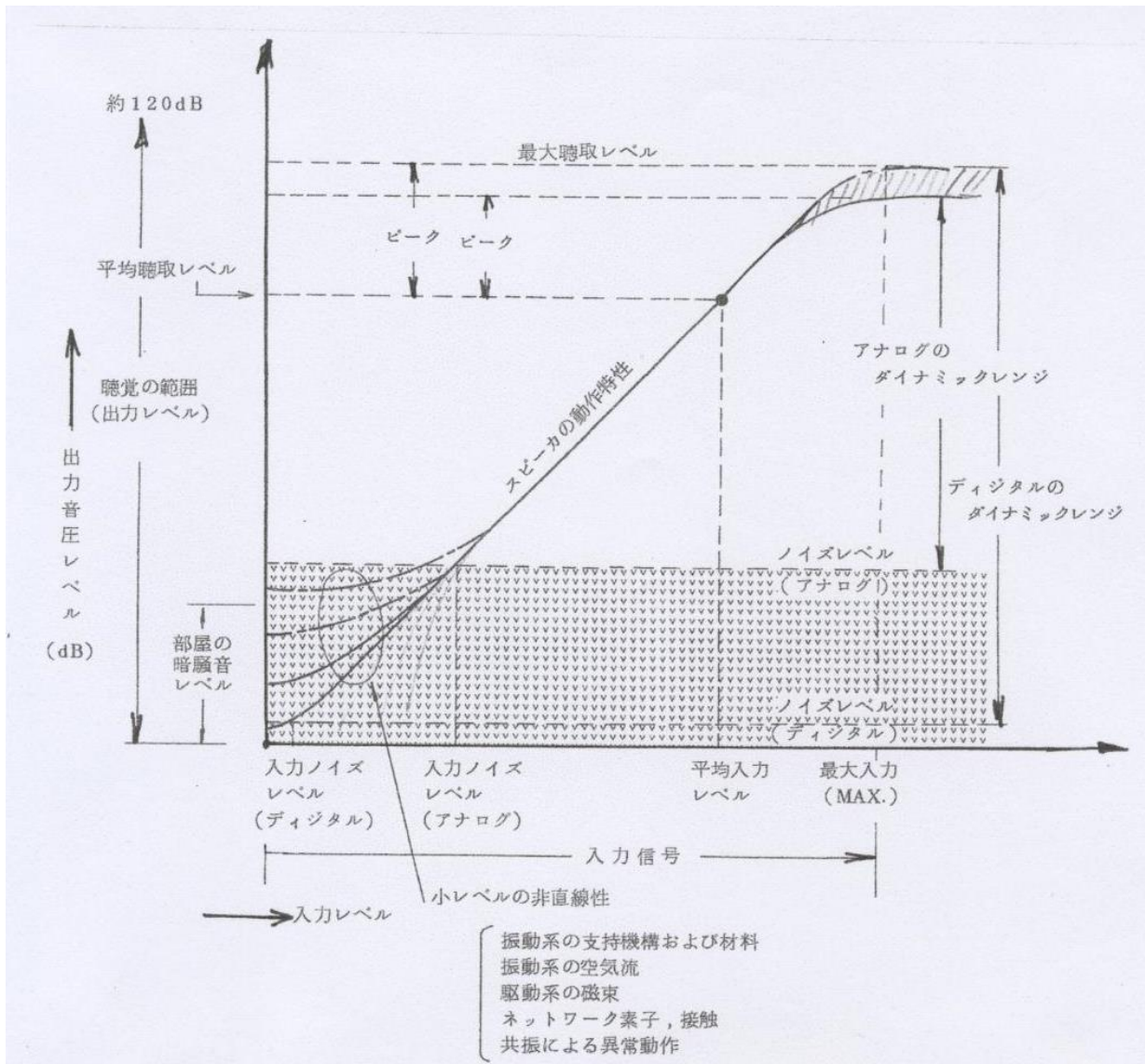


図-3: 平均聴取レベルが一定の場合のアナログソースとデジタルソースのダイナミックレンジの違い

[5] スピーカー用エンクロージャーの研究開発

「モーダル解析」は振動板の解析以外の応用として、スピーカーエンクロージャーの開発改善に役立ちました。

スピーカーは低音域を再生するため、バッフル効果を狙ってエンクロージャーに搭載するのが一般的です。しかし、スピーカーの振動がエンクロージャーに伝わって板の振動や共振が生じることや、背面に放射された音が内部で共振や定在波を発生し、音質性能に大きい影響を与えています。

これを改善するためにはここでも基本から見直しを行い、板に伝播するスピーカーの振動や共振の経路と、内部の空気によって生じる共振の経路を区別するよう、大きな真空炉でスピーカーを動作させ2つの経路を分離して、その因果関係を探ることにしました。この検討は前述の商品研究所の音響研究部の研究員によって行われ、その結果スピーカーの振動板を駆動する力の反

作用がフレームを通じてバッフル板を動かし、箱全体を振動させていることが主体であることを突き止めました。やっとスピーエンクロージャーの原点に立ち返った感じでした。7)

さらにエンクロージャーの研究開発は「モーダル解析」により、1978年からエンクロージャーの実態を3次元的なスローモーションの映像で観測(図-4参照)できるようになり、スピーカー取り付け穴の配置、木組みの構造、適切な補強材などを適切につかむことができるようになりました。そして剛性の高い箱鳴りの少ない構造のエンクロージャーの開発を短期間で作り上げることができるようになり、音質改善に大きな成果を挙げることができました。

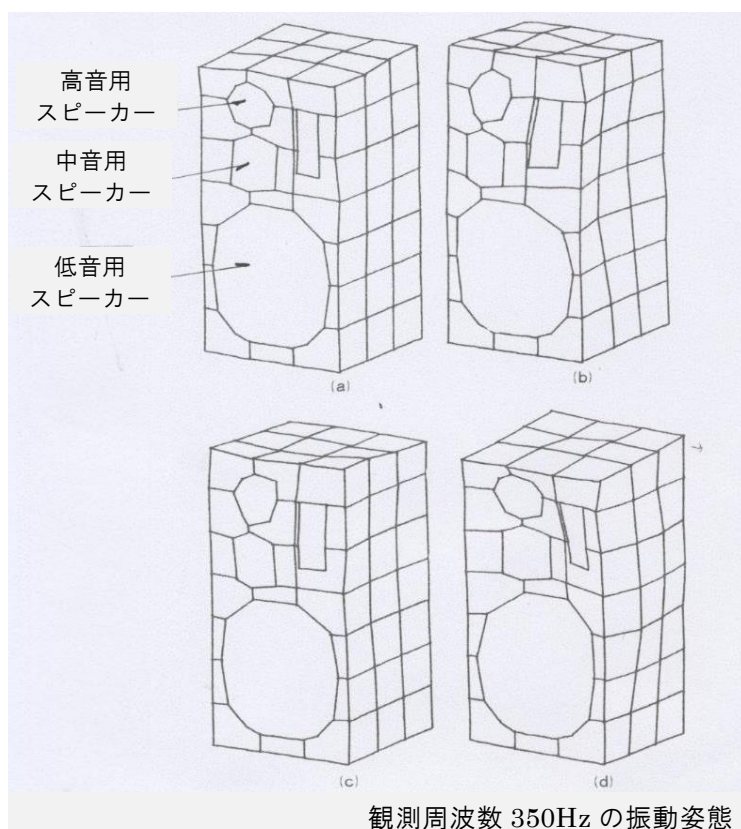


図-4：モーダル解析によるエンクロージャーのバッフル面と側面の振動姿態例

[6] スピーカーの周波数領域と時間領域を合わせた計測

米国のNASAに勤務しているリチャード・C. ハイサーが、1971年にAES誌にスピーカー測定で新理論の論文を発表し、1975年にオーディオ誌でダイヤトーンの2S-305型スピーカーを測定し評価を行ったので私はこれに注目しました。これはインパルス信号で測定し周波数領域と時間領域からスピーカーの測定を行い評価しました。

私は彼に会うことを約束しロスアンジェルスのご自宅を訪問しました。彼は私がおる日本から来たことで対応もよく、彼の考え方を聴くと共に彼の測定設備を拝見することができました。地下室にある設備はコンクリートむぎ出しの部屋で音の反響もありましたが、彼に尋ねたところ短いインパルスであれば多少の反射は大丈夫と言い、エネルギータイム・レスポンスによる低音と高音の音波の到達時間の差や、エンクロージャーの振動の過度応答などを測定データで示してくれました。

この測定をダイヤトーンでも実施できれば、これまで判らなかつた物理的特性の分析が得られると思いました。特に過度応答を時間領域で提示して見ることは非常に重要だと思いました。帰国したら、早速機材の入手をしたい思いがいっぱいになりました。

一方1975年、英国のKEF社のJ.M. バーマンとL.R. フィンチャムが「デジタル技術を使ったスピーカー評価」を発表し、集積スペクトラムと称する時間軸と周波数軸と音圧レベル軸で示す3次元表示で音の消え方を示した「コムラティブ・ディケイ・スペクトラ」データを発表しました。このとき使われたのがヒューレットパッカード社のFFTのコンピューター計測器でした。

私は、スピーカーの計測技術の世界が大きく変化していると感じ、早急にダイヤトーンが対応しないと遅れをとってしまうとの焦燥感を抱きました。5000万円ほどする高額な測定器でしたが早速購入して世界の先端技術に追随してゆかなければならないと思いました。急いで購入するには、手続きのための時間を短縮することが一番だと考えました。これには直訴するしかないと思いいルール違反でしたがこれをやってのけ、ついに 1976年6月に購入できスピーカー研究は一段と進みました。(写真-3) 今から思えばあのタイミングは絶対必要でしたし、上層部の方々の反応も早かったと思っています。



写真-3：設置した FFT 装置を前に立つ筆者手に持つのは当時の磁気ディスク

測定機材の到着までにこのデジタル計測技術を習得する必要がありました。この担当として開発部隊の伊藤実氏が朝の5時頃から毎日のように出社して無響室の使用ローテーション外の時間にインパルスの発生や、デジタル計測を研究し、FFTによるインパルスレスポンスの計測が出来ました。(図-5) そして彼はついにスピーカー計測の第一人者として活躍するようになり、多くのデジタル計測手法を開発しダイヤトーン技術を支えてくれました。

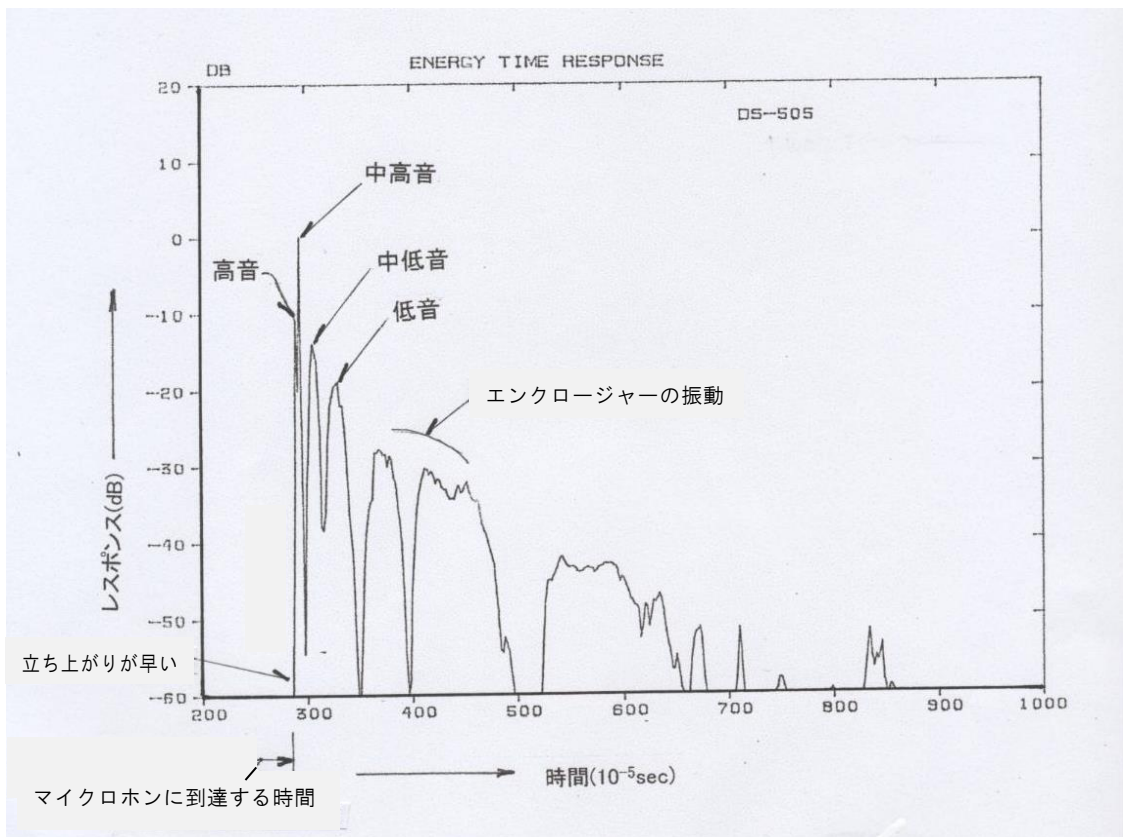


図-5：時間領域で示す4ウエイスピーカーのエネルギータイムレスポンス例

[7] 高剛性思想への取り組み

これを契機にダイヤトーンは、これまでの周波数領域の測定から時間領域を含めた3次元測定で評価できるようになり、過度応答の悪い部分の解析に「モーダル解析」による検討で改善でき、その結果から「高剛性思想」を打ち出すことができました。

これは音の立ち上がりの鋭さや、音が消えていく過度応答の優れたスピーカーシステムのための設計思想で、次に来るデジタル・オーディオ時代に対応した高品質再生を狙うことでした。

[8] スピーカー用磁気回路の改善による低ひずみ化の検討

スピーカーの原点からの見直しの一つに、スピーカー用磁気回路でひずみの要因を検討し、低ひずみのスピーカーを完成させる必要がありました。

これには、1955年にNHK技術研究所で検討された磁極構造によるボイスコイルの駆動力の直線性と前側と後側の対称性が検討され磁極の外側に生じる漏洩磁束の磁束分布の対称性を求めて磁極のポールとプレートの構造を検討したのが最初でした。

私が提案したのはスピーカーのひずみの発生要因の中で、振動板の高剛性化によるひずみの低減と共に、中音域におけるボイスコイルで発生する交流磁束による周辺の磁性材料のヒステリシスループの影響で発生するひずみの低減でした。

既に低音域での振幅ひずみの低減は、振動板の支持部と磁極の駆動力の機械的直線性に起因するため改善が進んでいたため、中音域のひずみを低減することで総合的特性として低ひずみ化が実現できると考えました。

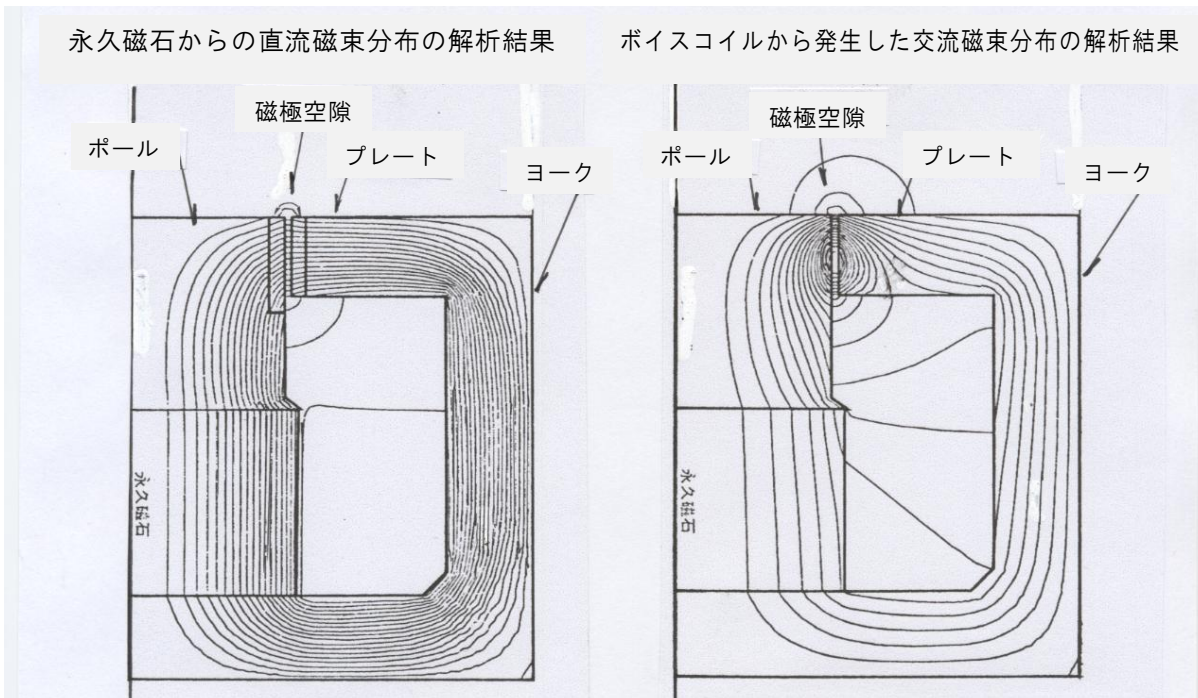


図-6：回転軸対称磁気回路の磁束分布の解析

このため磁性材料の研究者の土屋英司氏とグループのメンバーによって1976年に磁気回路の中を流れる交流磁束の解析を有限要素法により基本的な部分から解析し、図-6に示すように磁極

周辺に集中することを明確にしました。そしてこの対策には、ボイスコイル周辺の磁性材料を交流特性のよい材料を部分的に使用することで低ひずみ化が実現できることを導き出しました⁸⁾。これによって1978年に低ひずみ磁気回路として磁極にハイ μ のニッケルと鉄の合金リングを組み込み中音域のひずみ低減に成功しました。

また、直面した問題としてアルニコ磁石からフェライト磁石を使った磁気回路になったの音質の違いについても研究し、成果を上げました。

このようにスピーカーを原点から見直し、色々な課題を解決してゆくうちに要素技術がいつばい出来、それを組み合わせて使いこなすことが重要になりました。丁度料理のコック長のように、腕の立つコックを信頼し客の喜ぶ料理を高い技術で次々と作り上げ、客に提供し評価を得るように、スピーカー開発でも開発技術者が次々と高品位再生のスピーカーを生み出し、高評価が得られる好循環を作り上げる楽しみを味わいました。

参考文献

- 1) 中山剛、越川常治、三浦種敏：音質評価法の基本的考察、
日本音響学会誌 21巻4号 1965年7月
- 2) 厨川守、遠藤謙二郎、茂木憲夫：音質のすべて、
無線と実験別冊 1980年11月
- 3) 小泉孝之、木村博雄：レーザホログラフィによるスピーカーの進藤測定
電気通信学会、電気音響研究会資料 EA72-19 1972年11月
- 4) 進藤武男、八嶋修、武藤浄：有限要素法によるスピーカー振動系の解析、
日本音響学会講演論文集 3-3-7 1976年10月
- 5) 八嶋修、鈴木英男、進藤武男：有限要素法によるスピーカーの振動解析
電子通信学会技術研究報告 EA77-63~65 1978年2月21日
- 6) 佐伯多門：「音響部品面でのデジタル対応策」スピーカーにおけるデジタル対応策、
日本電子機械工業会 1980年電子工業技術大会 2A-4-1 1980年
- 7) 八嶋修、森田茂、鈴木英男、小泉孝之：モーダル・アナリシスによるエンクロージャーの
振動解析、ラジオ技術 1978年9月
- 8) 土屋英司、岡田将、池田英男：磁気回路の非線形性によるスピーカーのひずみ、
電気学会 磁性材料研究会資料 MAG-78-7 1978年1月