

HIBINO NEWS

MONTHLY

3

1992

1992年3月10日発行

発行/ヒビノ株式会社AVC販売事業部 東京都港区港南3-5-14 千108 03-3740-4361・FAX 03-3740-4360
大阪営業所/06-339-3890・FAX 06-339-3898 福岡営業所/092-475-2555・FAX 092-482-4535 札幌営業所/011-753-8391・FAX 011-753-8418

《特集号》

フィールドで瞬時に音響測定。 小型・軽量・多機能サウンドラボ TEF-20のすべて。



※注1 ※注2 ※注3 ※注4

アマクロンのTEF-20は、ETC、EFC、FTCのいずれも可能なフィールド測定システム“TEF”の最新世代。RS232CインターフェースによりマッキントッシュやIBMコンパチブルのコンピュータをホストコンピュータとして、スタジオ、劇場、会議室等の音響特性、音響機器の測定を、周囲のノイズに関係なく瞬時にして行なえるそのパワーに、ますます磨きをかけています。

ブルダウンメニュー方式により、面倒なコマンドを打ち込むことなく、高精度なクラスターアラインメント用の測定、RT₆₀測定等の操作が可能な上、専用のファンクションキーにより測定をスピードアップ。ETCカーブ、NCカーブ等を瞬時に表示することができます。

様々なモードを備え、スタジオ、SRから、街頭、空港、工場でのノイズ測定等、あらゆる測定ニーズに対応するTEF-20は、既にJBL、ALTEC等のスピーカーメーカー間でもDSPデータフォーマットの基準システムになっており、ラスヴェガス・ヒルトンホテル、フォード社等様々な分野での音響測定スタンダードとして高い実績を持っています。今回はこのパワフルな測定ツールの大特集。その全貌をご紹介します。

※注1: TEFとは、時間(Time)、エネルギー(Energy)、周波数(Frequency)の略称です。

※注2: ETCとは、エネルギー/時間カーブ(Energy Time Curve)の略称で、時間領域で表した音響エネルギーの大きさです。

※注3: EFCとは、エネルギー/周波数カーブ(Energy Frequency Curve)の略称で、周波数領域で表した音響エネルギーの大きさです。

※注4: FTCとは、周波数/時間カーブ(Frequency Time Curve)の略称で、時間領域で表した周波数です。

※注2~4の詳細は9ページをご覧ください。

※Amcronは米国Crown社の海外向けブランド名です。

CONTENTS

1. 小型でパワフルな測定システム、TEF-20の概要。 P.2

— TEF-20とは何なのか —

ソフトウェアベースの発展性。可能性に優れたコンパクト設計。時間、周波数両領域をカバーした方法論、TDS理論が不可能を可能にした。高度な測定・分析を身近に。視覚的な説得力が魅力のシステム。TEFは進化するアナライザー。豊富なオプション・ソフトウェア。

2. それは1967年第33回AESにおけるR.ヘイザーの論文から始まった。 P.3

— TEFシステム開発ストーリー —

TEFはTDSとして出発。
システム10誕生、そして20へ。
より小型に、高速に、システム20誕生。

3. あらゆる用途に対応するパワーと制度で一歩抜きこんでTEF。 P.4

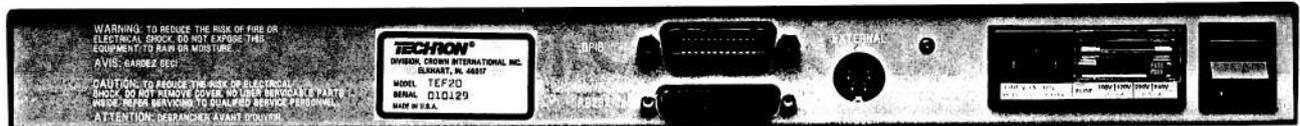
— TEF-20は、何ができるのか —

多彩な測定モード、ワン・ボタンプッシュの操作性。
TDS理論に基づく測定器はTEF-20だけ。比較してわかるTEF-20のメリット。
1回のキーストロークで、これだけのデータ収集が可能です。

4. TEFシステムの設計思想を支えるコンセプト、TDS理論。 P.8

— TEFをめぐる諸概念 —

TEFとは何なのか、どこが違うのか
音は立方体。そのすべての面を測定するTEF。
時間と周波数の関係をつきつめる。
測定における不確定性を極限まで排除する。
周波数と時間を上手に制御するTDS理論。
時間の窓、距離の窓、そしてTDS楕円体。
フィルター窓を最適に設定することが肝心。



裏パネル
コネクター
GPIB
RS232

1. 小型でパワフルな測定システム、TEF-20の概要。

TEF-20とは何なのか

ソフトウェアベースの発展性。 可搬性に優れたコンパクト設計。

アムクロンのサウンドラボTEF-20は、DSPベースのハードウェアと専用のソフトウェア「サウンドラボ」から構成される音響特性測定システムで、ホストコンピューターとしてはIBM-PCもしくはマッキントッシュのコンピューターを使用、1U×320mm、4.7kgというコンパクトネスとロープライスからは想像もできないキャパビリティを誇っています。使用するコンピューター次第ではその処理速度をスピードアップすることができ、また、ソフトウェアベースですから、バージョンアップによってその機能を限りなく拡張していくことが可能。いつまでも最新システムであり続けます。

時間、周波数両領域をカバーした方法論、 TDS理論が不可能を可能にした。

そもそも、音響機器の特性測定・分析は、従来無響室で行なわれるのが普通でした。しかし、大型の音響システムや既に設置済みの機器は無響室に持ち込めませんし、現場で無響室と同じ条件で測定することなど不可能です。しかし、TEFの登場がそれを可能にしました。TEFの設計思想であるTDS理論は、これまでの測定システムになかった独自のアプローチを採用することにより、直接音、間接音、残響音を任意に切り取って組み合わせでの表示や、時間遅れや位相乱れの検出を可能にしました。時間、周波数両ドメインにわたって、測定の“窓”を制御しながらデータを収集するので、測定環境を選ぶことなく、周囲のノイズの中でも迅速かつ正確に測定して、機器や音響空間の問題点を即座に把握することができるようになったのです。

高度な測定・分析を身近に。 視覚的な説得力が魅力のシステム。

タイム・ディレイ・スペクトロメトリーの頭文字を採ったこのTDS理論については後で詳述することにします。ともかく、これによって、

これまできわめて困難であったスピーカークラスターのアライメントや、会話の明瞭度、残響特性、NC評価といった数々の分析が、すばやく正確に行なえ、しかもわかりやすく表示できるようになりました。従来、高価で難解な測定機器を使用する一部専門技術者にしかできなかった高度な測定・分析が、ミキシングエンジニアはもとより、建築設計者や音響コンサルタントをはじめ、誰にでも簡単にできるようになったわけです。分析結果はIBM-PCやマッキントッシュのディスプレイとリンクさせて表示することができますが、その視覚的なわかりやすさゆえに、例えば建築や音響システムのプレゼンテーションにおいても、クライアントに対する説得力は飛躍的に向上しました。TEFが音響業界をはじめ、広く産業界のスタンダードとなるに至った秘密は、そこにあるのです。また、測定データはASCIIフォーマットでの格納が可能であり、各種アプリケーションソフトによるプロセッシングにも万全に対応します。JBLやアルテック、コミュニティ、レンカスハイツといったスピーカーマーカーの間で、コンピューターとDSPによるデータフォーマットの基準システムをTEFとする合意が取り交わされた事実も、そのワン・アンド・オンリーのパワーと高い信頼性を物語るものと言えるでしょう。

TEFは進化するアナライザー。 豊富なオプション・ソフトウェア。

アムクロンのTEF20/Sound Labはニーズに合わせてパワーアップする、いわば進化するアナライザーです。例えばアップグレード・オプションの一つ、TEF20HIではより迅速なDSPが可能になっており、オプション・ソフトウェア「ハイパーシグナル」とのコンビネーションにより、高度なワークステーションとして機能することができます。これは、無響室での声や楽器の音響データをもとに、数々のシミュレーション・データを使って、それが現場の環境ではどのように響くかをイミュレートすることができるユニークなバージョンです。

2. それは1967年第33回AESにおけるR.ヘイザーの論文から始まった。 TEFシステム開発ヒストリー

TEFはTDSとして出発。

TEFシステムは、カリフォルニア工科大学のジェット推進研究所のスタッフだったリチャード・ヘイザーの発明になるもので、この考え方は、1967年10月のAESにおいて発表された当初、そのものずばりTDSと呼ばれていました。TEFと呼ばれるようになったのは1979年からです。これまで見てきたとおり音の移動に伴う時間遅れを補正しながら周波数測定を行なうこの方法は、TEFシステムの根幹となる理論であるわけですが、長いあいだ、一人の人物を除いてこの方法を採用する人はいませんでした。その人物とはセシル・ケイブルで、1977年、彼はTDSを踏まえた実験結果を発表、初期反射に起因する周波数特性の乱れとフィードバックとの因果関係を明らかにしました。これがSyn-Aud-Con社のドン、キャロライン・デイビスの目にとまり、自分たちのセミナーで講演してくれないかと要請されます。このデモンストレーションによって、TDSへの関心がにわかになり、78年にはSyn-Aud-Con自身が、TDSの使い方を教授するセミナーを開く権利を獲得、このセミナーやパンフレットによって、TDSへの関心はますます高まってきました。

1979年、Syn-Aud-Conはヘイザーの開く研究会のスポンサーとなるに至り、これを機にETCが一般化、TDS測定はTEFと呼ばれるようになります。当初は既製の波形/FFTスペクトラムアナライザーや100kHzオフセットオシレーターといった機材が組み合わせて使用されておりました。2つのアナライザーを接続し、大まかなETC、EFCはできましたが、FTCは手でプロットイングしなければならず、3Dに至ってはまだヘイザーの研究室で眠っている状態だったのです。

システム10誕生、そして12+へ。

そして1979年、クラウン社がカリフォルニア工科大学から、TEF機器製造のpatentを獲得、テクロンTEFシステム10が誕生しました。入念な開発プログラムを経て開発されたシステム10は、重量18kg、幅457×高さ266×奥行き660mmのポータブルな一体型システムで、リアルタイムアナライザーと同じくらいポピュラーな測定機となっていきます。

システム10は、メモリー容量64kBのZ80マイクロプロセッサに基づきCP/M OSにおいて動作する汎用マイコンで、プログラムやデータの管理は2基のFDDによって行なわれておりましたが、マイコン技術の飛躍的な発展に伴い、キャパシティを1MBに増強したシステム12+としてグレードアップ、より高速な処理とイージーオペレーションを実現しました。

より小型に、高速に、システム20誕生。

現在のシステム20が完成したのは1990年12月のことです。重量わずか4.5kg、1Uサイズ、奥行き30cmのDSPベース超小型ユニットで、RS-232Cシリアルリンクにより、いかなるコンピューターをもホストとして使用できるフレキシブルなシステムとなりました。機器やマイクからの入力信号はADCによって即座にデジタル化

され、以下の過程ではDSPによってすべてがデジタル領域で処理されます。TEF測定にあたっては、ホストコンピューターからコマンドを送り、TEFが測定結果をホストに送り返して、表示やさらなる処理、ストレージを可能にします。

TEF開発年表

1967年	リチャード・ヘイザー、第33回AESにて「タイムドレイ・スペクトロメトリーによる音響測定」論文発表。「TDSによって、理論的には如何なる環境下でも素早く無響室測定が実現できる。」とした。
1971年	ヘイザー、ETCに関して「スピーカー信号到着時間の決定」論文を発表。
1977年	セシル・ケイブル、TDS理論に基づいたはじめての実験を行ない、初期反射に起因する周波数特性の乱れとフィードバックの因果関係を説明。これに着目したSyn-Aud-Con社の主宰、ドン、キャロリン・デイビスが、ケイブルとともにTDSのデモンストレーションを全米で展開、TDSへの関心が一気に高まる。
1978年	Syn-Aud-ConがTDSセミナーを行う権利を得る。
1979年	Syn-Aud-Conにより「TEF」という用語が使われ始める。 FFT、波形アナライザー、可変オフセット発振器を組み合わせた最初のTEFアナライザーが作られる。精度は低いながらもETC、EFCの測定が可能となった。
1983年	クラウン社、TDSの特許を保有するカリフォルニア工業大学より、専用のTEF測定器製作の許可を与えられる。 秋、クラウン社のTechron事業部が、TEFIO発表。ポータブル・キャリアの測定器。 (重さ20kg、48cmW×27cmH×66cmD) 信号処理=アナログ・ハードウェア データ処理=内蔵コンピューター(Z80, RAM64kB, CP/M) プログラム/データ保存=2×5"FD
1986年	TEF12発表。(TEF10より10%軽量、30%安価) ソフトウェア・パッケージ(ETC/EFC/3D/PFC/NPP), Easy TEF(FFT), Auto TEF, TEF RCH, Polar, V-Box-Res, Workbench, Window
1988年	TEF12+発表。 信号処理=アナログ・ハードウェア データ処理(スピード3倍) =内蔵コンピューター(RAM1MB, DOS-like CP/M compatible, Cache memory装備) プログラム/データ保存=HD
1989年秋	信号処理を、従来のアナログ領域からDSP使用によるデジタル領域へ移すことの検討開始。これにより、より低コストでより早い処理が可能となる。
1990年12月	TEF20発表。(重さ5kg、1U×31cmD) 信号処理=TEF20のDSP上で行われ、RS232Cでホスト・コンピューターとシリアル・リンクする。 データ処理=ホスト・コンピューター(IBM/Mac)上で走る、「サウンドラボ」ソフトウェアによる。 ソフトウェア・パッケージ: ETC, EFC, PFC, STI, RASTI, %ALcons, RT60, EDT, NC curve, NLA

3. あらゆる用途に対応するパワーと精度で一步抜きんでるTEF。

TEF-20は、何ができるのか

多彩な測定モード、 ワン・ボタンプッシュの操作性。

TEF-20は、IBMもしくはマッキントッシュにおいて運用される専用ソフトウェア「サウンドラボ」をベースにしていますが、それではこの「サウンドラボ」、いったいいかなる能力を持っているのでしょうか。ここでは、TEF-20の備える豊富な能力について、ご紹介することにします。

「サウンドラボ」ソフトは、行なうべき測定をTEF-20に教え、TEF-20が受け入れたり生成したりしたデータを視覚的な情報に変換する役割を持っています。こうしたTEF-20と「サウンドラボ」のコンビネーションをベースに、クラスターアライメントやディレイラインのための測定や、NCカーブ表示、明瞭度の測定等、様々な測定用途に応えることができます。しかも、すべてのモードがワンボタン・プッシュのイージーオペレーションで、数々の専用キー、シンプルな英語によるコマンド、便利なプルダウン・メニューによって誰にでも簡単に操作でき、特別に煩雑なトレーニングを行なう必要がありません。TEF-20を使って行なえる主な測定は、以下のとおりです。

■周波数特性

TEF-20のTDS測定は、従来機と比して16倍ものデータを収集することができ、広い帯域の測定を行ないながら、低域のディティールをも維持することができます。

■クラスターアライメント

フィードバックを起こすことなく最大のゲインでスピーカークラスターをドライブするためには、クラスターを正確にアラインする必要があります。TEF-20のタイムレスポンスETC測定は、最高8192ポイント、最高15msecといったきわめて短い時間の緻密な測定にも対応。明瞭度の高い、パワフルなSRをサポートします。

■ディレイライン

SR会場でスピーカークラスターが分散している場合でも、TEF-20のタイムレスポンス測定によって、それぞれに最適なディレイタイムを決定することができ、ポイントソースによるエキサイティングなSRを実現します。

■イコライゼーション

リピートモードでEFC測定を行なうことにより、システムを、より容易に、より正確にイコライゼーションすることができます。

■初期反射

聴感上のエネルギーを増加させたり、あるいは逆に明瞭度を悪くしたりフィードバックの原因になったりする様々な反射音の状態をETC測定によって分析することができます。

■残響

音の明瞭度に大きく影響するリバーブレーション。その残響時間RT₆₀とその減衰曲線を表示して、音響コントロールをサポートします。

■NC測定

オクターブバンドごとのノイズレベルを把握するNC(Noise Criteria)カーブは、各種産業での環境ノイズ測定における基準となりつつあります。TEF-20では、1回のキーストロークだけで

その地点のNC値を測定・演算し、NCカーブを表示することができます。

■明瞭度

子音明瞭度損失率(%ALcons = Percentage of Articulation Loss of Consonants)、会話伝達指数(STI=Speech Transmission Index)といった、きわめて複雑な計算も迅速に行ない、その値を表示する一方、Excellent(優)、Good(良)、Fair(可)、Poor(否)といったわかりやすい言葉による評価も可能です。また、周囲ノイズを考慮に入れた場合と入れない場合のいずれかを選択することも可能です。

■NLA

ある地点での騒音レベルの変化を、1分~24時間のレンジで測定するNLA(Noise Level Analysis)も可能。さらに、オプションのキットにより、AC電圧のふらつき等を記録することも可能です。

TDS理論に基づく測定機はTEF-20だけ。 比較してわかるTEF-20のメリット。

TEF-20に何ができるのかを、ざっとご紹介してみました。その能力をもっとよく知っていただくには、世に数多く出回る測定機と本機とを比較してみるのがベストかもしれません。RTA、FFT等の理論に基づき、各社それぞれに工夫を凝らした、完成度の高い製品ばかりではありますが、以下のようにそれぞれの限界を検証してみるとにより、TEF-20の持つ類まれなパワーをご理解いただけるものと思います。

■正弦波スイープ、ピンクノイズによるRTA方式

周波数特性のみの測定には有効ですが、位相情報、時間情報まではカバーできません。また、直接音、間接音を区別なく取り込み、ノイズも取り込んでしまうため、正確な音響測定を行なう上では限界があります。

■インパルスによるシングルチャンネルFFT方式

時間領域でもデータを収集でき、TEF同様のデータを得ることができる優れた方式ですが、レスポンス表示がリニアスケールであるため減衰振動が明確にならず、表示のダイナミックレンジも限られてしまいます。また、周囲のノイズが多い場合、これらを平均化して無視するための時間がかかって迅速な測定ができず、インパルスのクレストファクターが大きい為測定のSN比が稼げない、各瞬間における全エネルギー量を表示できないなどの問題点が残ります。

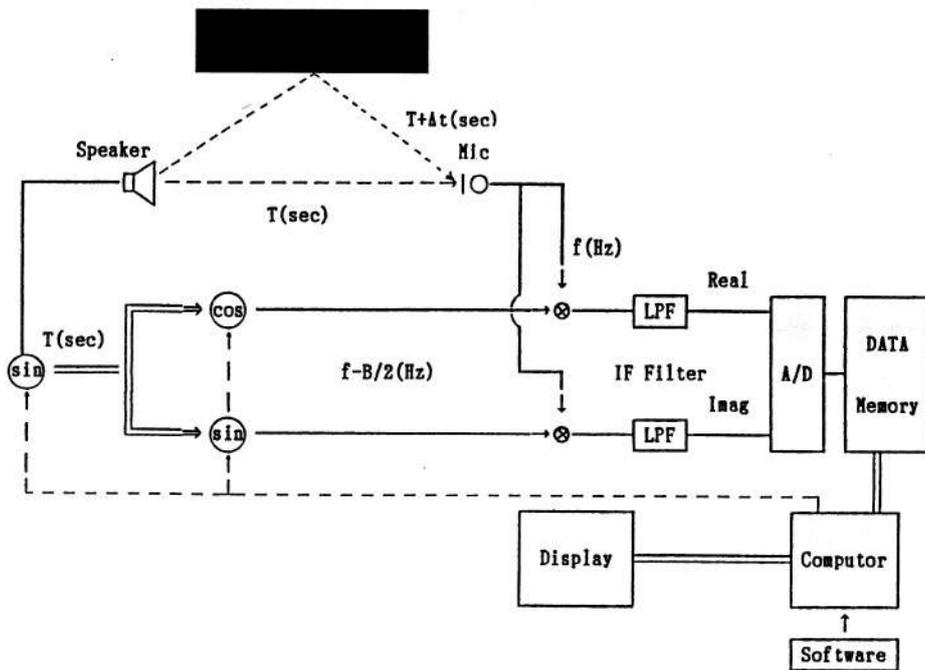
■擬似ランダムノイズや正弦波スイープ、音楽等のプログラムソースによるデュアルチャンネルFFT方式

これらも時間領域でデータを収集でき、TEF同様のデータを得ることができる優れた方式ですが、やはり周囲ノイズを平均化する時間がかかりすぎる上に、測定マイク用のプリアンプが必要であるため、そのキャリブレーションの精度が測定精度に影響してしまうおそれがあります。また、予測やシミュレーションが不可能であるという弱点もあります。

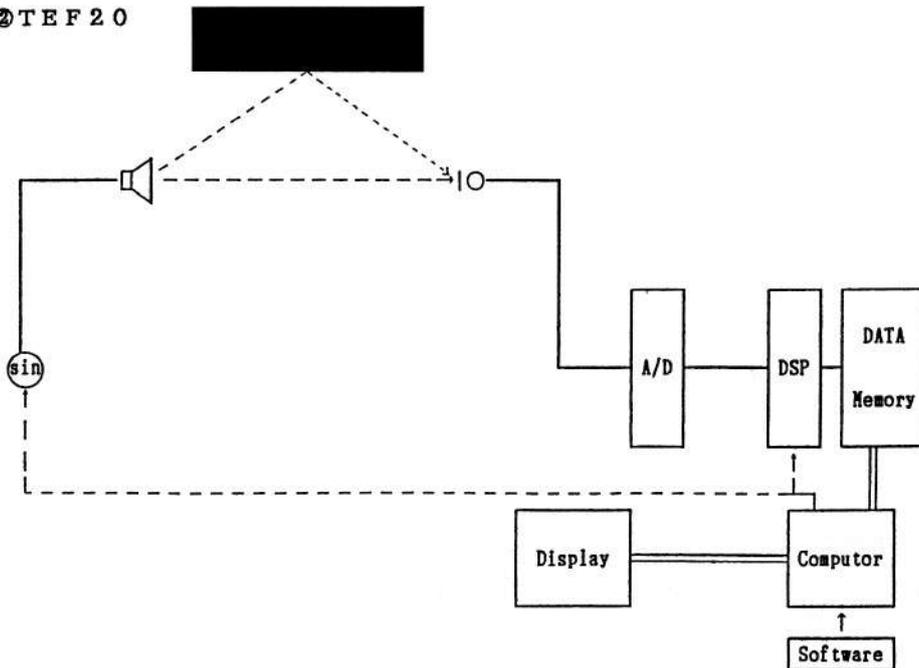
システムの発展

下のシステム図で明確なとおり、前機種にくらべTEF-20ははるかにシンプルなシステムとなっています。

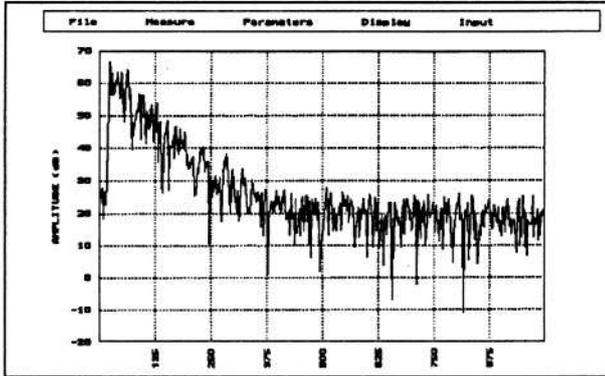
①TEF10/12



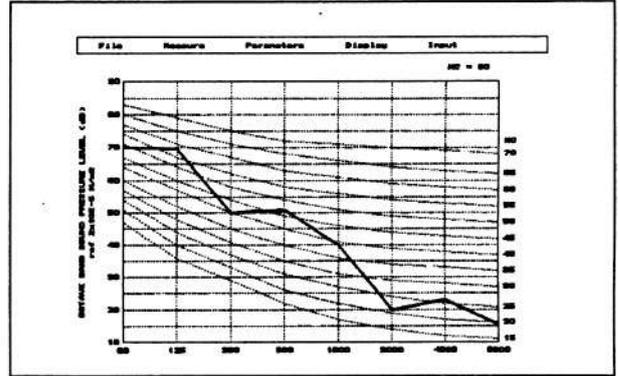
②TEF20



1回のキーストロークで、これだけのデータ収集が可能です。



タイムレスポンス(ETC)



NCカーブ

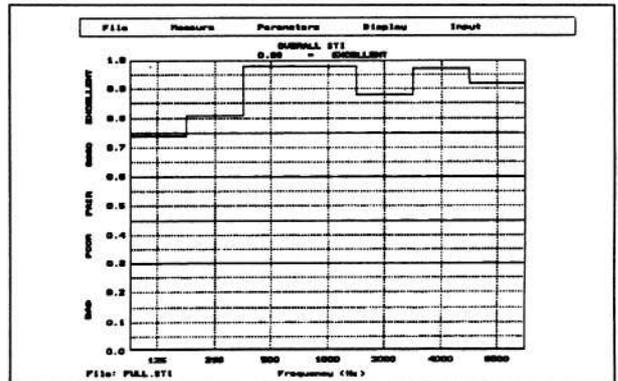
----- TSP SPEECH INTELLIGIBILITY TEST -----

FREQUENCY	STI	EARLY RTSD	S/N RATIO
125 Hz	0.74	0.46	7.2 db
250 Hz	0.81	0.52	8.3 db
500 Hz	0.88	0.60	14.3 db
1000 Hz	0.88	0.60	14.3 db
2000 Hz	0.88	0.55	10.0 db
4000 Hz	0.87	0.50	14.1 db
8000 Hz	0.82	0.48	14.1 db

----- OVERALL -----
STI = 0.88
Equivalent S/N Ratio = 13.0 db
Equivalent Early RTSD = 0.12 s

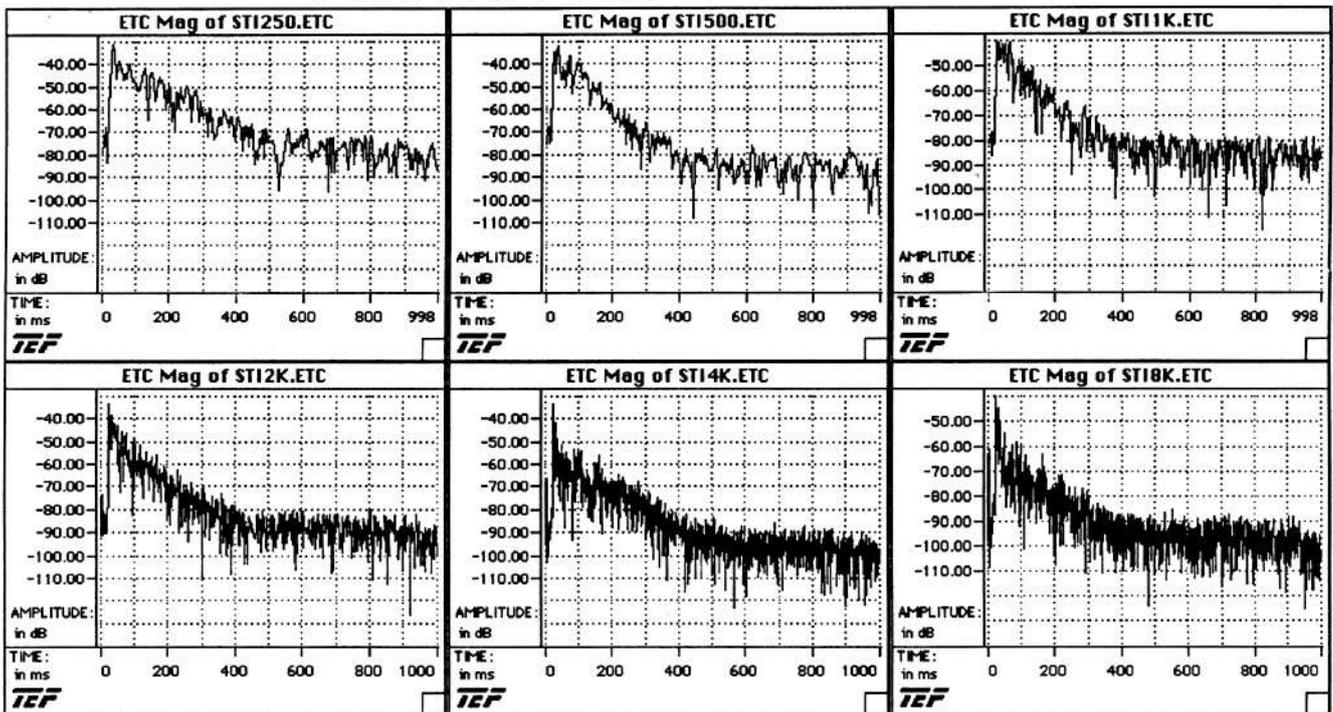
--- SUBJECTIVE EVALUATION ---
EXCELLENT

発音伝送指数(表による表示)



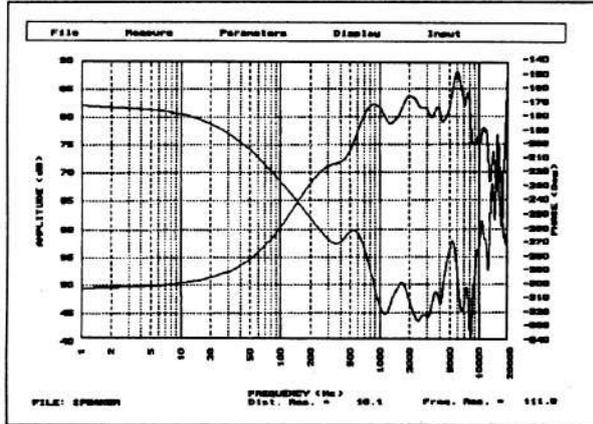
発音伝送指数(グラフによる表示)

以下は、マッキントッシュにて複数(最大20)の測定を同時に行なった例です。

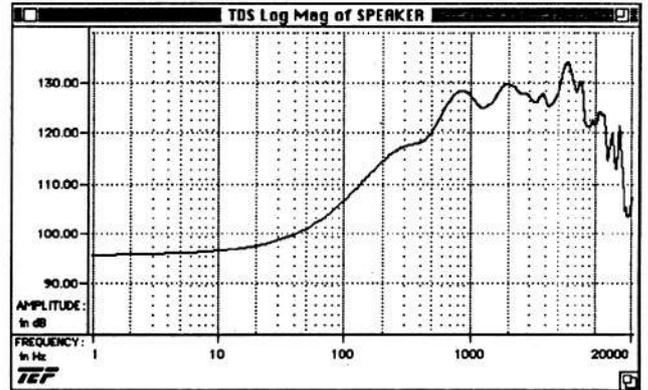


周波数特性TDS測定

TEF20は、従来機に比して16倍ものデータを収集できます。広い帯域にわたって測定を行ないながらも、低域の詳細を維持できます。



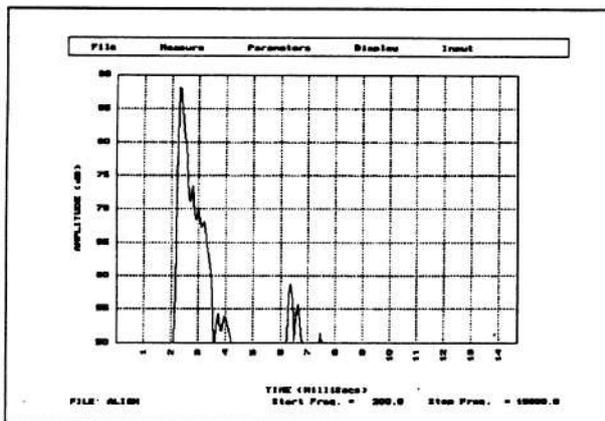
IBMによるTDS



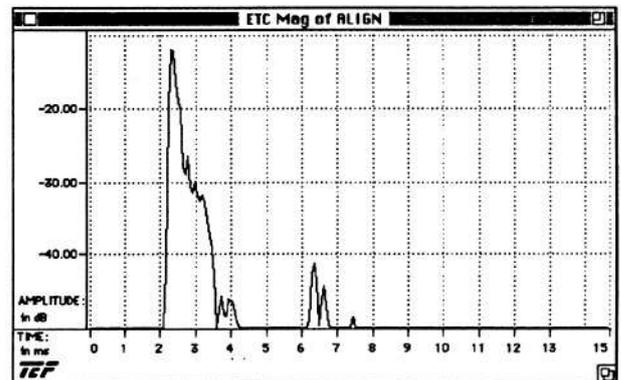
マッキントッシュによるTDS

タイムレスポンスETC測定

TEF20は、測定ポイントを512から8192まで変化させることができます。これによって、以下のようなきわめて長い時間、短い時間の正確な表示が可能になります。



IBMによるETC



マッキントッシュによるETC

TDS理論を踏まえたTEFは、時間、周波数双方の領域を考慮に入れることにより、直接音、反射音、残響音を別個に、あるいは組み合わせさせて表示したり、時間遅れ、位相の乱れを検出したりすることができ、しかも周囲のノイズに左右されず、迅速なシステムチェック、音響チェックができる唯一のシステムなのです。コンサート会場の音響コントロールやシステムチェック、産業環境のノイズ測定、ス

タジオ設計等々、音に関わるあらゆるシーンで、TEFが測定ツールのスタンダードとなっている理由が、そこにあります。それでは、TEFをこれほどまでにパワフルなツールとしているこのTDS理論とは何なのか、その概要と背景、その開発に至るヒストリーなどを以下にご紹介することにしましょう。

4. TEFシステムの設計思想を支えるコンセプト、TDS理論。 TEFをめぐる諸概念

TEFとは何なのか、どこが違うのか

TDSについてご説明する前に、そもそもTEFについて、そしてTEFをめぐる様々な概念についてご説明した方が、よりいっそう理解を深めていただけたらと思います。

TEF分析とは、そもそも入力と出力を持つ2ポートシステムの試験のために開発されたものであり、測定の3つの次元、すなわち時間(Time)、エネルギー(Energy)、周波数(Frequency)、このT.E.F.のいかなるコンビネーションをも可能にするものです。最も一般的なコンビネーションはエネルギーvs周波数。つまり周波数特性です。ご存じのとおり、これは、図1のようにX軸に周波数、Y軸にエネルギー(振幅)をとったグラフで表わされますが、私たちはこの「エネルギー/周波数カーブ」Energy Frequency Curveの頭文字をとってEFCと呼んでいます。出力電圧vs時間のコンビネーションも一般的で、これはインパルスレスポンスと呼ばれており、図2のように、X軸に時間、Y軸に出力電圧をとったグラフになります。この場合、インパルスが与えられた後、出力電圧がどう変化していくかを見ることはできますが、総エネルギーの一部しか測定することができません。

図3は、図2の測定データを別の形で表わしたもので、「エネルギー/時間カーブ」Energy Time Curveの頭文字をとってETCと呼んでいるものですが、これならばトータルのエネルギーを測定することができ、被験機器について、いっそう豊富な情報を提供してくれます。それに、縦軸はボルトではなくdB目盛になっているため、細部まで簡単に見ることができます。

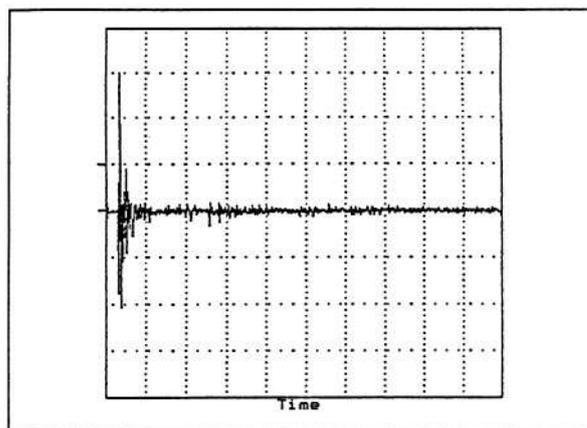


図2：インパルス特性

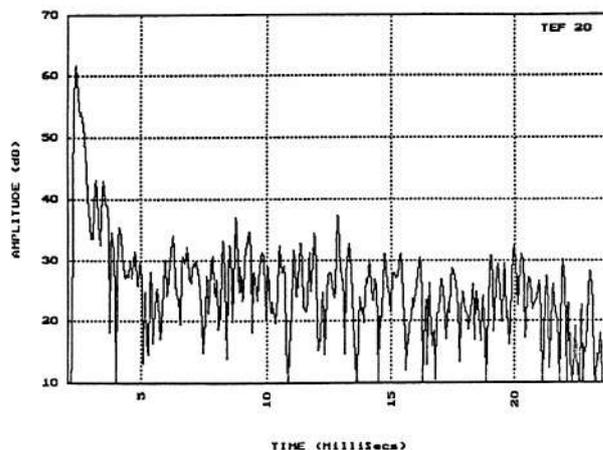


図3：エネルギー/タイム・カーブ(ETC)

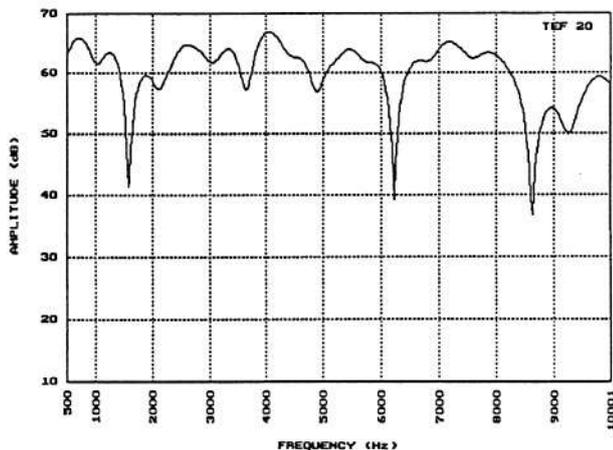


図1：周波数特性カーブ

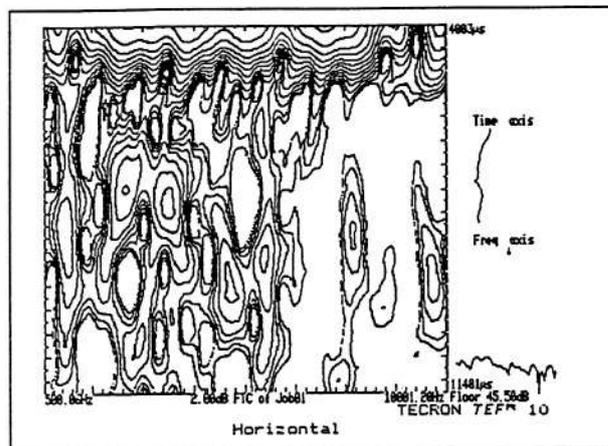


図4：周波数/タイム・カーブ(FTC)

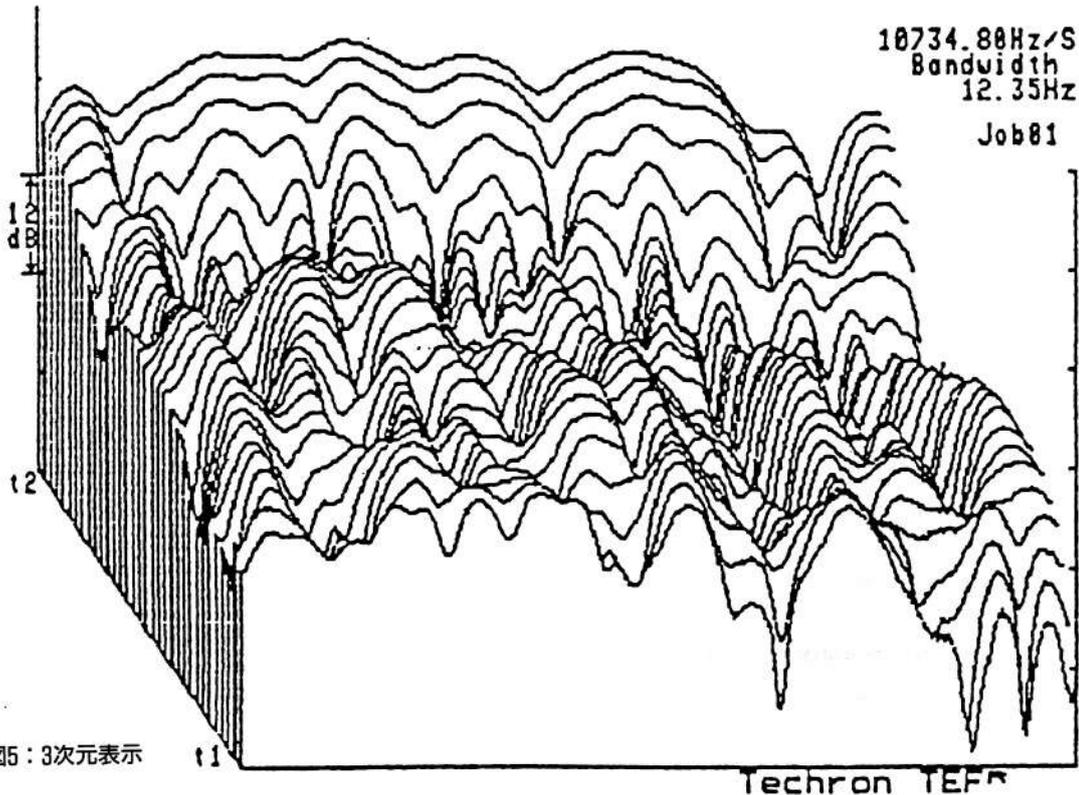


図5：3次元表示

次は周波数と時間のコンビネーションによるカーブ。図4がそれで、Frequency Time Curve、FTCと呼んでいます。これはあまり一般的ではありませんが、X軸に周波数、Y軸に時間をとってエネルギーの残量をdBの輪郭で表わすものです。

さて、こうしたT.E.F. 3つの次元を組み合わせたのが3次元(3D)ディスプレイで、その形状からウォーターフォール(滝)ディスプレイとも呼ばれており、横軸に周波数、縦軸にエネルギーをとるのはEFCと同じですが、手前から奥へ行く軸が追加されており、これが時間を表わしています。これなら、被験機器のあらゆる次元における特性を一度に見ることができるわけです。

一般的に言って、従来の測定機は時間と電圧又は周波数というパラメーターに固定されたものが多かったのですが、TEFは、T.E.F. 3つのパラメーターとエネルギーを自由に組み合わせることができる点に特長があります。つまり、いかなる条件下でも測定が行なえるわけです。TEFは、例えばFFTのように時間の領域ではなく周波数の領域でデータを集めますが、これによりノイズの排除能力が向上し、ノイズレベルの大きな環境においても有効な測定を行なうことができ、測定結果の表示もスピードアップしています。さきわめて小さな信号レベルでも万全に測定できるため、被験機器をクリップさせたりしてノンリニアな状態にしてしまう心配がありません。

音は立方体、そのすべての面を測定するTEF。

ここでT.E.F. 3つの測定次元について、もっと考えてみることにしましょう。ここにガラスの立方体があるとします。立方体ですから、高さ、長さ、奥行の3つの次元を持っています。そしてこの中に、曲がったワイヤーを入れてみましょう。図6がその様子ですが、図7のように、高さと幅の面から見ると、ワイヤーの高さがどのように変わっていくかをみるすることができます。しかし、その奥行方向はどうなっているかはわかりません。そこでこれを90度回転させると、今度は奥行はわかって、長さ方向で高さがどう変化するかはわからな

くなります。ですから、この1つの次元を一度に見るためには、図6のように立方体を45度回転させ、さらに手前に傾けてやればよいわけです。ただ、これだと、読み取る値は実際の値より小さくなってしまいます。紙に左から右へ一本の線を書いて目の高さを持ち、紙を回転させると、線は実際より短く見えるのと同じです。しかし、どれぐらいの角度でそれを回転させているかをきちんと知っていれば、見かけに惑わされることなく真の値を決定することができるわけです。

音もまた、こうした立方体を形成していると考え、その次元はそれぞれ時間、エネルギー、周波数となります。立方体を三つの面の頂点から見れば、高さvs幅、高さvs奥行、幅vs奥行の3つの次元を一度に見ることができます。同じように、このTEF立方体で、エネルギーvs時間(ETC)、エネルギーvs周波数(EFC)、周波数vs時間(FTC)のすべてを測定することができるわけです。図9がそのTEF立方体です。よく時間領域、周波数領域などと言いますが、このそれぞれの測定の縦軸(X軸)の次元がドメイン、領域ということになるわけです。T.E.F. この測定の3つの次元については充分に理解しておくことが大切ですが、ここでは特に周波数と時間の関係について検証します。

時間と周波数の関係をつきつめる。

時間と周波数。これは実のところ、同じことを違う言い方で表わしているのです。例えば振り子の動きを表わす時、「振り子が右から左へ、左から右へ1/2秒で動いている」と言うと、周期が1/2秒だということ、これは時間領域での言い方です。また、「振り子が右から左へ、左から右へ2Hzの頻度で動いている」とも言うことができます。つまり「1往復するのに1/2秒かかる」と「1秒間に2往復する」とは同じ事象を時間と周波数の異なった側面から述べたもので、いずれの言い方も正しいわけです。

時間領域での考え方と周波数領域での考え方は相互に関連して

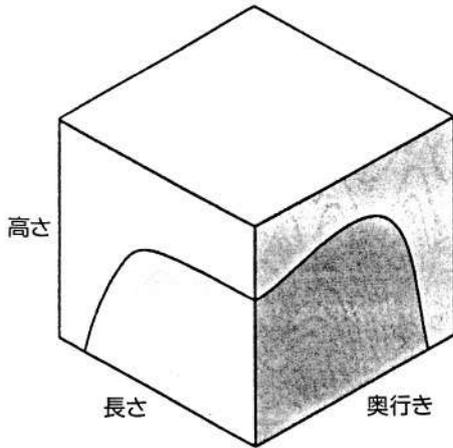


図6：3次元立方体

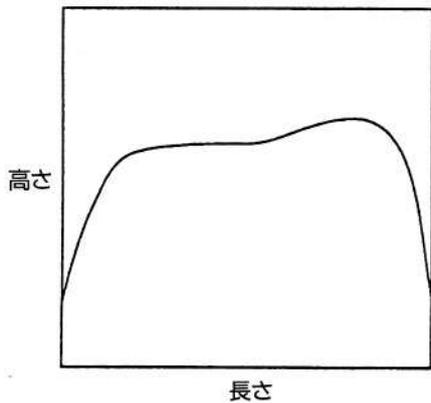


図7：2次元立方体。これでは奥行きがわからない。

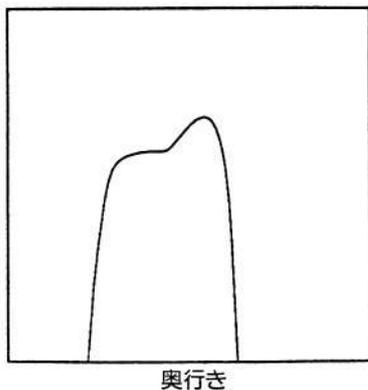


図8：2次元立方体。今度は長さがわからない。

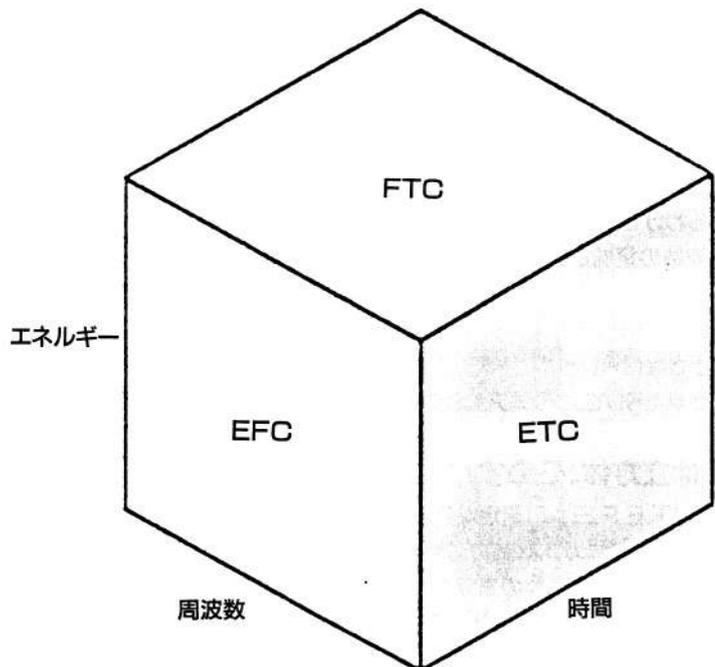


図9：TEF立方体

います。周期は $1/F$ 、つまりHzで表わした周波数分の1とイコールであり、周波数は $1/T$ 、つまり秒で表わした時間分の1とイコールです。例えば20Hzの正弦波の場合、その周期は $1/20$ 、つまり0.05秒であり、そのサイクルを0.1秒とした場合、周波数は $1/0.1$ 、10Hzとなるわけです。

さて、こんなに単純な例ではなく、時間領域のパターンが複雑で、様々に異なる周期を持つ音楽信号の場合にはどう表わせばいいのかわかると、もちろん、時間と周波数の根本的な関係は変わりませんが、数学的には若干複雑になります。時間と周波数の関係を数学的に表現したものがフーリエ変換(Fourier Transform)です。複雑な信号において、時間領域での言い方を周波数領域での言い方になおすのがフーリエ変換であり、その逆を行なうのが逆フーリエ変換です。例えばインパルスレスポンスのような時間領域での信号は、フーリエ変換によって周波数領域での表わし方、つまり周波数特性という形で言いかえることができるわけです。図10、11は同じ信号を、時間領域、周波数領域それぞれの表わし方で示したものです。図11は、図10の正弦波をフーリエ変換したもので、線の高さが振幅を表わしているわけです。

複雑な信号の測定にはFFT、すなわち高速フーリエ変換を利用したアナライザーが用いられますが、これは時間領域における信号のサンプルを採って、これに特殊なフーリエ変換を行なって周波数領域における表わし方、つまりスペクトラムとして示すものです。TEFアナライザーももちろんこれが可能ですが、周波数特性の測定には使用しておらず、代わりに同期掃引フィルターによって周波数領域での測定を行なっています。また、TEFアナライザーによるETC測定は、周波数領域で集めたデータを、逆フーリエ変換によって時間領域に置き換え、表示したものに他なりません。

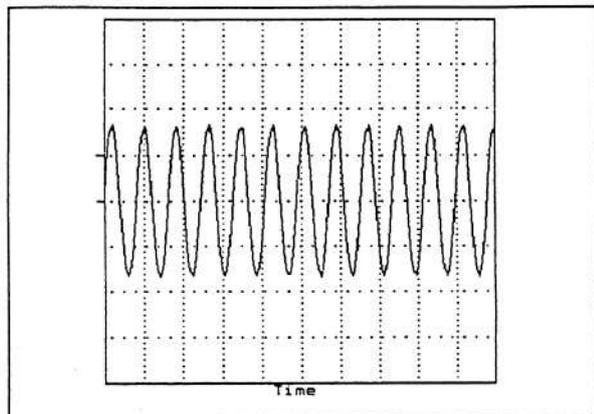


図10：正弦波信号(時間領域)

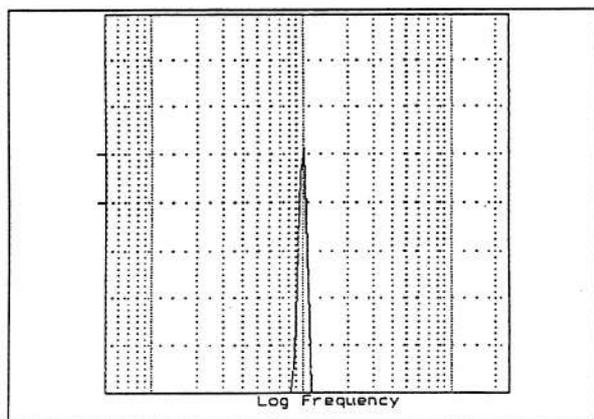


図11：正弦波信号(周波数領域)

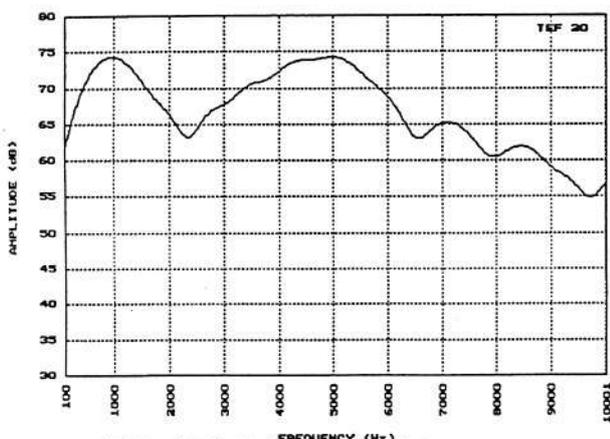


図12：必要な周波数をスイープするフィルター

測定における不確定性を極限まで排除する。

さて、TDSを理解していただくためには、時間と周波数の問題に関連して、もうひとつ不確定性の原理という考え方について見ておく必要があるでしょう。我々が何かの量を測定する時、どれくらい細かく検出できるのか、つまり分解能には限界があります。もし1msという分解能にて時間領域の測定を行なう場合、1msより速いものについてはその細部を見ることはできません。周波数領域でも同じで、1kHzという分解能にて測定する場合には、1kHz以下の細部を見ることはできません。その結果、例えば500Hzの

分解能で周波数特性を測定した図12のように、山や谷は平滑化され、細部まではわからないということになるわけです。音楽信号のように時々刻々変化する量を測定する場合、そのデータは結局ある時間の幅の中での測定値でしかありません。もし瞬間瞬間の本当のデータを測定しようとするれば、測定機には無限大の帯域幅が必要になってしまうでしょう。先述のように、周波数と時間は相互に関連しているわけですが、測定において原理的に避けることのできないそうした不確定性を克服するには、一方の領域における分解能が常に他方の分解能に影響していることを理解し、周波数と時間、いずれの領域がその測定に有効かをフレキシブルに考え、調整できるシステムとすることが必要になります。TEFのアナライザーは、こうした考え方に立つことにより、周波数領域で測定しながらも、単なる時間領域測定では到達しえない精度を獲得しているのです。

周波数と時間を上手に制御するTDS理論。

さて、こうした背景を踏まえて、TDS理論について見ていくことにしましょう。TEFのシステムがベースにしているTDSテクニックとはTime Delay Spectrometryの略で、スピーカーからの直接音や、反射音等、時間的に遅れたスペクトラムの遅延を補正して測定する方法をさしており、直接音のみ、直接音+間接音、間接音のみを自由に表示することができます。「サウンドラボ」で周波数特性測定を行なう場合、そこで使われるのはこのTDS理論なのです。

例えばスピーカーの周波数特性を行なう場合に従って、TDSの原理を見ていくことにしましょう。まずTEFアナライザーは、メニューにて設定された開始/停止周波数に従ってスイープ正弦波のテスト信号を発生します。この出力がスピーカーに送られ、測定マイクの出力はTEFの入力へ戻されます。戻ってきた信号は、テスト信号と同期したフィルターを通るのですが、このフィルターがキーポイントです。スピーカーからマイクへの信号の移動に要する時間分の周波数が補正された形になっており、そのバンドワイズやスイープレートはメニューによって設定されるようになっています。フィルターに対する、この独自のアプローチがあってこそ、TDSが可能になるわけです。

とはいえ、信号の移動に要する時間の補正は、TDSプロセスの持つパワーのほんの一端でしかなく、その本当の実力は、例えばスピーカーからの直接音といった知りたい信号だけを測定して、あとは排除できる点にこそあると言えるのです。例えば図14では、20Hz幅のフィルターが毎秒10000Hzでスイープしています。もちろんこれは便宜上四角形にただで、実際には図15のように両エッジが3dB落ちる山型をしています。ここで、周波数fは今、左からフィルターのバンドワイズに入ろうとしており、真中の図ではフィルターのスイープが高くなって、fにチューニングされています。右の図ではフィルターのスイープはそのままで、fが出ていこうとしています。フィルターは幅20Hzでスイープしており、スイープレート、つまりフィルターが毎秒スイープするスピードが10000Hzですから、フィルターが20Hzをスイープするには2msかかることになります。知りたい周波数fは、2msの間だけフィルターの中にあるわけです。この一瞬のことを、時間の窓、タイムウィンドーと呼んでおります

が、フィルターはこの2msの窓に入った信号のみを受け取り、例えば反射音のような他の要素は排除してしまう設定になっているわけです。

図15は、反射音がフィルターによってどのように排除されるかを示すものです。この場合、フィルターは7.85msの遅延用に設定されており、窓は2ms、つまり直径2msの窓になっています。すると、フィルターが設定された時間の±1ms以内に到着した信号だけが窓に入ることができます。フィルターは8.85msの遅延用に設定されていますから、8.85±1、つまり7.85ms~9.85msの間に到着した信号だけが受け入れられ、あとは排除されることになるわけです。スピーカーからの直接音は8.85msで窓の中央にやってきましたが、反射音がぎりぎりここに飛び込むためには9.95ms以内に到着しなければなりません。この図で反射音を通る道筋は15フィート、13.28msですから、フィルターの窓が開いている間には到底入り込むことができず、排除されてしまいます。すなわちここでは、反射音を無視してスピーカーの直接音だけが見事に測定できたわけです。まさに無響室測定そのものです。

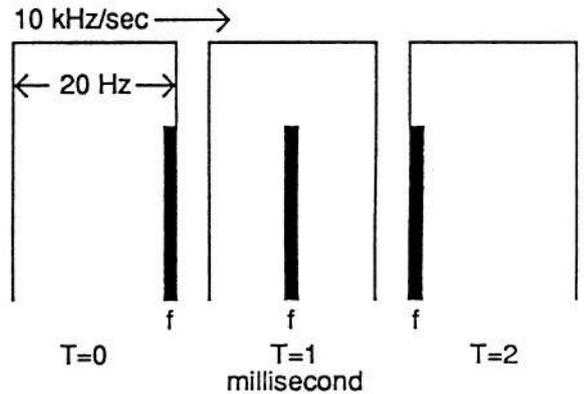


図13

時間の窓、距離の窓、そしてTDS楕円体。

時間の窓を設定することにより、いかにして、必要な信号のみが測定できるのかがご理解いただけたでしょうか。ところで、この時間の窓という考え方には、実のところ距離の窓という考え方も含まれています。これは、時間の窓の時間内に音が移動する距離によって決定されるもので、例えば時間の窓が2msだとすると、音の速度は毎秒1130フィートですから、2msでは2.26フィート移動することになります。これを距離の窓と考えるわけです。つまり、±1.13フィート(2.26フィートの1/2)以内の道筋を持つ音は、測定の対象になってくるといことです。例えばもしマイクの0.565フィート後方に反射する壁があると、スピーカーからの音がマイクを通り過ぎて壁に反射して戻ってきますから、直接音と反射音の差は1.13フィートとなって、反射音は窓の端にかかってしまうことになります。図17から19を見ながら、反射音が測定にどう影響してくるのかを考えてみましょう。図17は反射音のない特性、図18は、窓の端に反射音がかかっている場合の特性です。窓のエッジはフィルターの3dB落ちのポイントに相当し、これによっていくぶんか反射の影響が抑えられています。反射面をもっと離せば、フィルターはもっと減衰してくれるはずですが、図19は、反射音が完全に窓の中へ入ってしまっている場合ですが、これではもう測定など意味がなくなってしまいます。

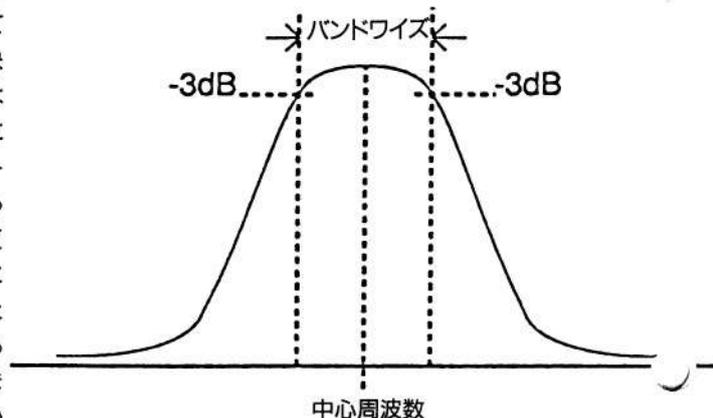


図14

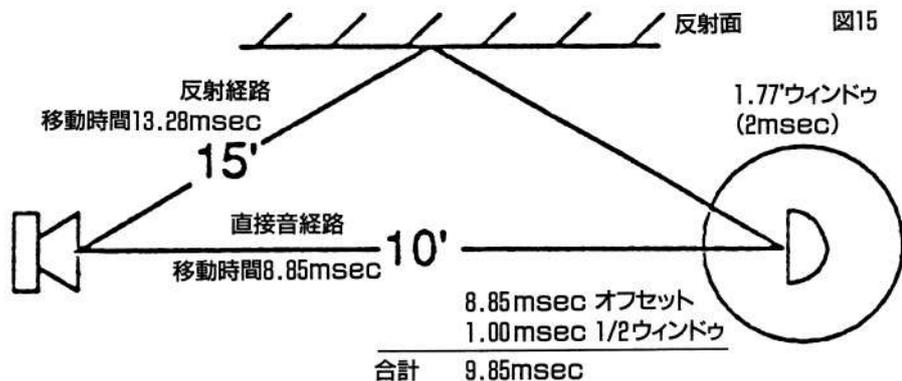
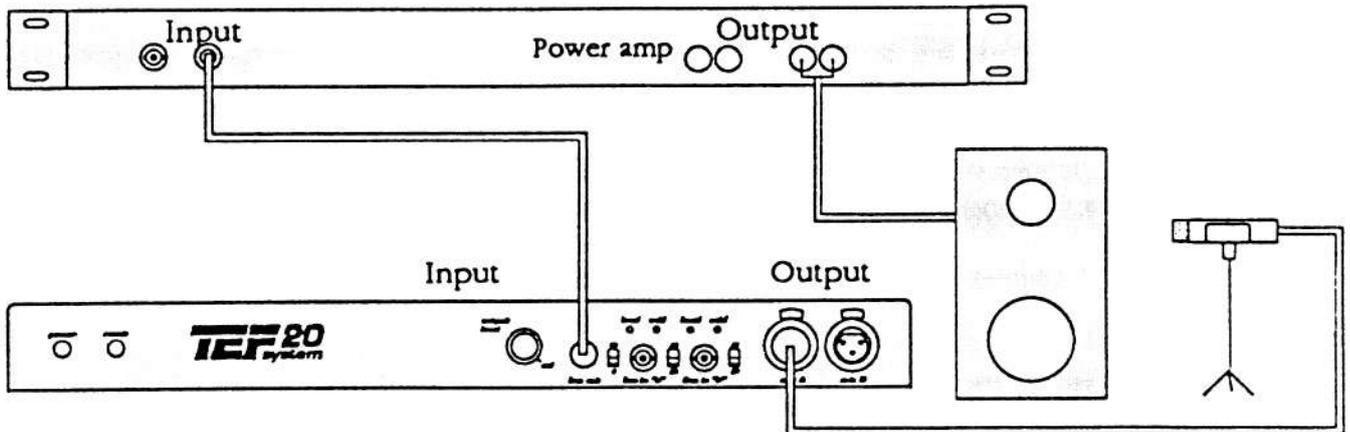


図15



TEFシステムの基本的接続例

距離の窓は、マイクにもスピーカーのまわりにもあります。図15の例にまた戻りますが、ここでもスピーカーから0.565フィートの位置に反射面があると、この反射も測定に影響してきます。このように、反射面があってはならない範囲を考えていきますと、2つの距離の窓は、図16のように、ちょうど立体的な楕円を形成します。これをTDS楕円体と呼んでいます。ここでは楕円体の上部に反射面があって、これは図18のように影響してきますが、この楕円体の境界面上のどこに反射面があっても、同じような影響が出てきます。この楕円体はフィルターの減衰特性によって形成され、その大きさは距離の窓によって決定されるものであり、窓が大きくなれば当然楕円体も大きくなります。また境界面からの反射音は3dB落ちとなって、楕円体の中であれば減衰の影響を受けません。

測定の分解能は、このように時間の窓と距離の窓という2つの窓に左右され、さきほどの例ならば、時間の窓を2msに設定することにより、反射音を無視して必要な周波数の測定だけが可能になったわけですが、反射音を完全に排除するために周波数の分解能が犠牲になってしまうケースもあります。またキャビネットに2つのユニットのあるスピーカーを考えてみますと、どちらかのユニットがもう一方よりわずかに前に出ている場合、その信号はわずかに先に到達します。窓が2msである場合、この両ユニット間の非常に短い時間的な差は検出できなくなってしまうのです。しかし、この場合には、時間の分解能を細かくして、つまり時間の窓を小さくしてやれば、一方のドライバーを楕円体の外に出してしまったのと同じ効果が得られることとなります。

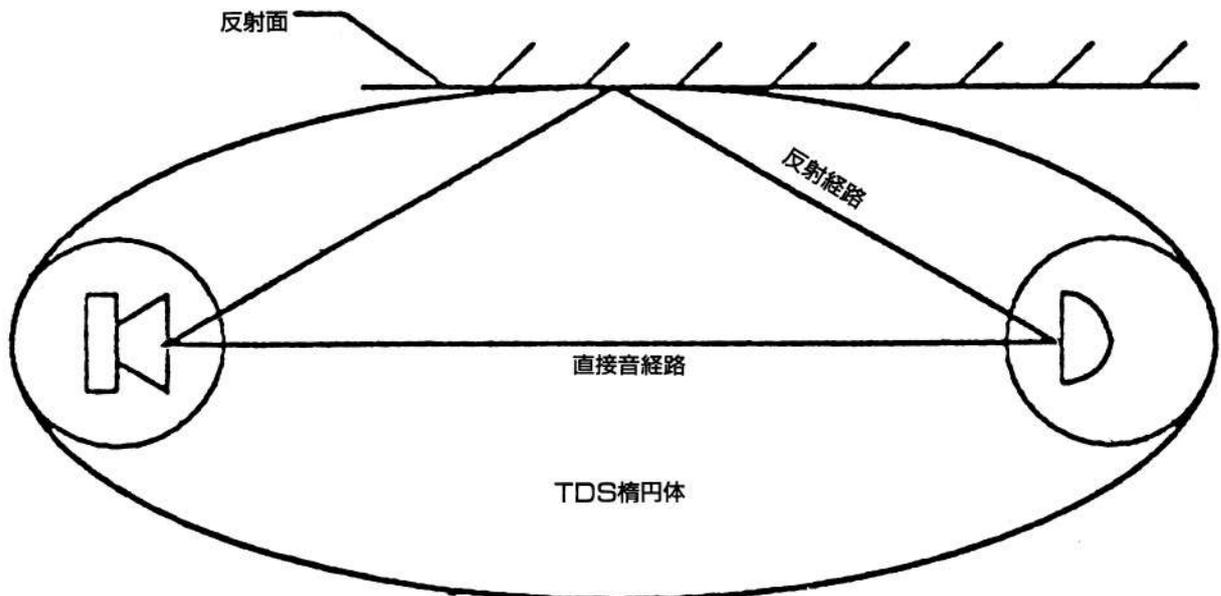


図16：TDS楕円体

フィルターの窓を最適に設定することが肝心。

ところで、先述のように、時間と周波数の関係は相互的な性質がありました。不確定性原理のことも思い出してください。時間の分解能を細かくしすぎると、周波数の分解能が低下してしまうのです。時間の窓が2msの時、周波数の分解能は1/0.002、500Hzでしたが、両ユニットの特性を正確に測定するために時間の分解能を0.1msにしたとすると、周波数の分解能は何と10000Hzにまで落ちてしまいます。これでは最低のスピーカーでも最高の特性になってしまいます。

このように、時間と周波数の関係は、時間と周波数双方の分解能によってもたらされるもの以外の何ものでもありません。不確定性の原理は、どの領域を制御しているか、どのようにデータを処理しているか、あるいはテスト信号に何を使っているかに関わりなく、すべての測定システムにあてはまるものなのです。

しかしTEFアナライザなら、この時間と周波数の関係を最適に調整することができます。何を測定するのか、どのような条件の空間で測定するのかを考慮しながら、適切なスイープレートを設定し、また適切なスイープレートとバンドワイズを設定して時間、周波数双方の分解能のバランスをとることができるシステム。この設計思想こそが、TEFを他の方式から大きく引き離す最も大きな特長なのです。

したがって、実際の測定においてまずしなければならないことは、時間、距離、周波数の分解能を決定すること、そしてTDSフィルターのスイープレートとバンドワイズを設定することであり、このスイープレートとバンドワイズのコンビネーションこそが測定分解能を決定するのです。各パラメータはマニュアルでも設定できますが、コンピューターによる自動セットアップの方が便利でしょう。スイープレートとバンドワイズのコンビネーションは、文字通り無限のパターンが用意されていますが、どれがベストかは、一般にスイープを速くした方が良いということを目安に決めるとよいでしょう。逆にスイープレートを遅くしていけば、コンピューターはこれに応じて自動的にバンドワイズを小さくし、要求される分解能を維持します。スイープレートを遅くし、バンドワイズを狭めていくことにより、測定のSN比は最も高くなりますが、このキャパビリティはTEFの大きなメリットと言えるでしょう。周囲に雑音がほとんどない状態では、スイープを非常に速くして0Hz~20kHzのレンジを1秒以下で測定することができます。アンビエントノイズが大きい場合、スイープを遅くし、バンドワイズを狭くしてノイズを排除するわけです。実際のメニュー画面、そしてその後の操作の流れについては、13ページでざっとご紹介しておりますので、ご参照ください。

さて、これで、TEF、TDSをめぐる概念についてご理解いただけたものと思います。では、このTDS理論がどのように生まれ、発展してきたのか。最後に、その歴史をさぐってみることにしましょう。

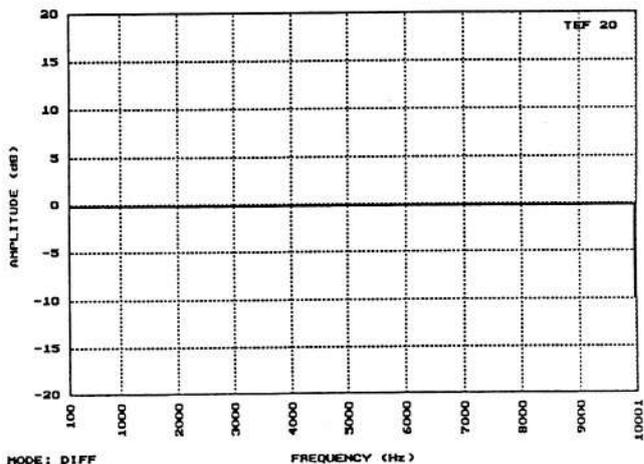


図17：通常の周波数特性。反射なし。

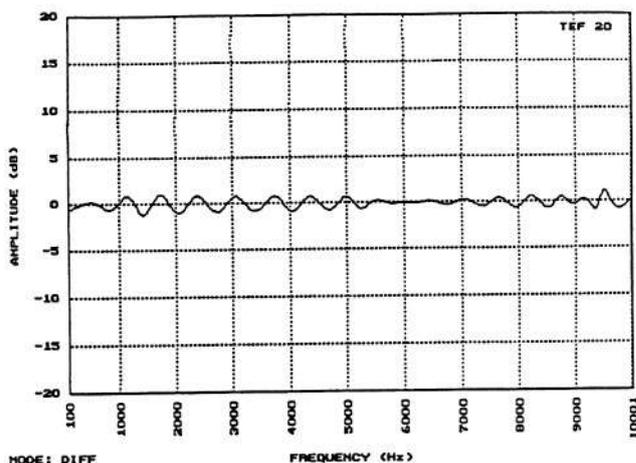


図18：ウィンドウ端に反射音が飛び込んだ場合の特性

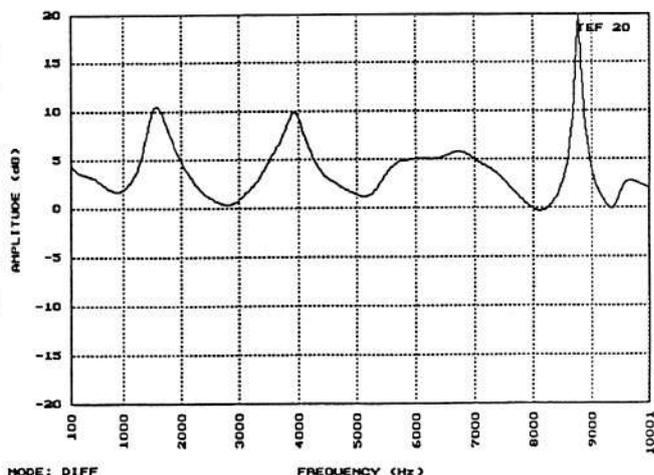


図19：ウィンドウ内に反射音が入ってしまった場合の特性

操作の一例と表示例

「サウンドラボ」をスタートさせた時、最後に使用した時のセッティングがそのまま保存されていますので、再スタートさせ、各種パラメーターをメニューにて設定していきます。例えばスピーカーの周波数特性を行なう場合の操作手順のごく一部をご紹介します。まず入力メニューで「セットアップ」を選択、プリアンプ、チャンネルAを選択して、例えばB&K4007であれば54dBといったように、マイクゲインを選択します。次にパラメーターメニューにて「タイムレスポンス」を選択し、開始周波数を100Hz、停止周波数を

24kHzに、スイープ時間を1秒、受け取り遅延を0msとします。512までのサンプル数を設定、ウィンドウを「ハミング」とします。これで、タイムスパンは9.1ms、すなわちETCタイムテストは左の0msから右の9.1msまで行なわれることになります。ディスプレイメニューで「タイムレスポンス」を選び、オートスケーリングをオンにします。これで、スイープを1秒間行なうと、ETC測定が行なわれ、図20のような表示になります。0~3msの間には何も表示がありませんが、これはスピーカーからマイクへの移動に要する時間を表しているわけです。その他、いくつかのディスプレイ例を挙げておきました。

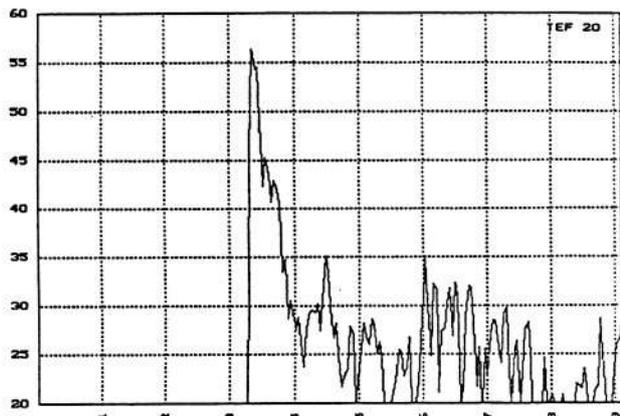


図20：ETCタイムセット

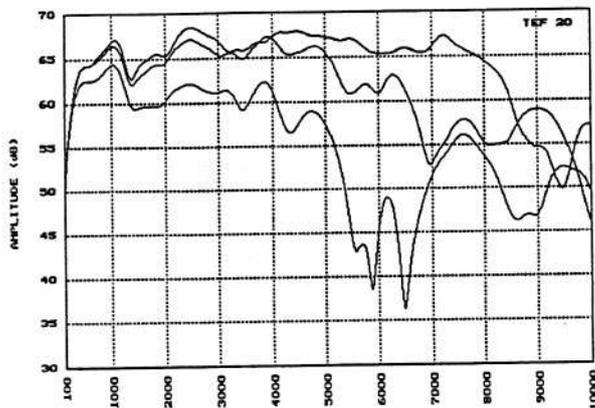


図23：複数の測定を比較するオーバーレイモード

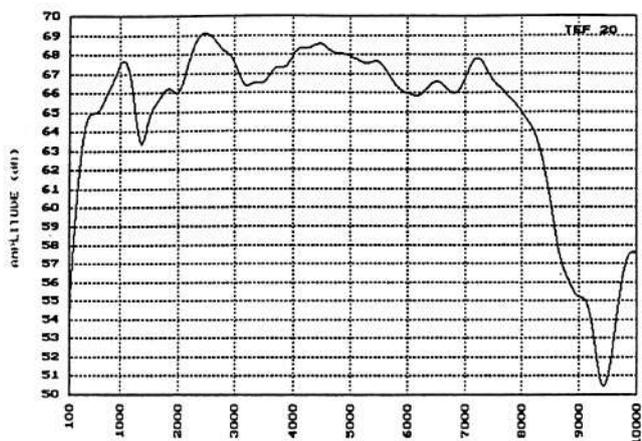


図21：EFCディスプレイ

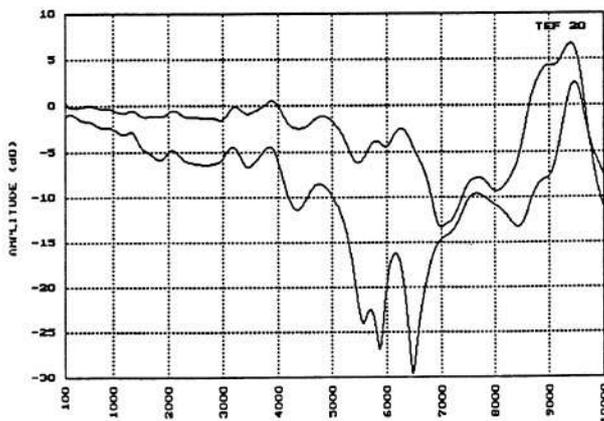


図24：ディファレンスモードによるデータ比較

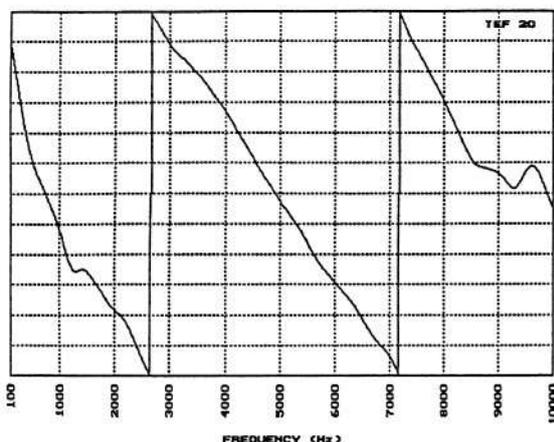


図22：位相によって受け取り遅延を微調整

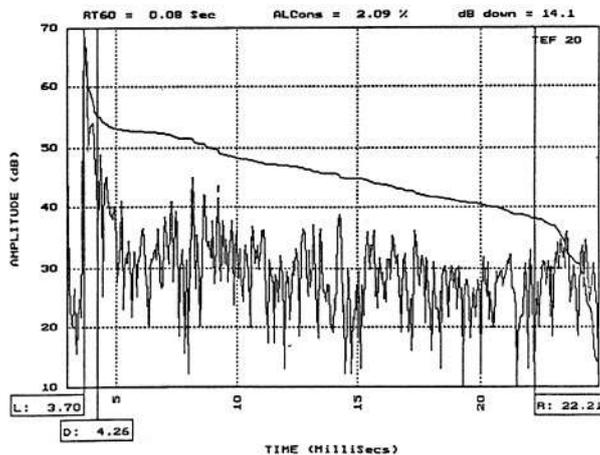
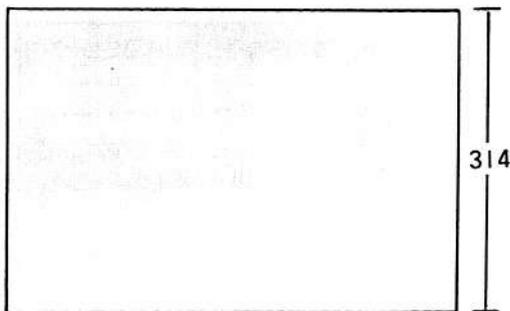
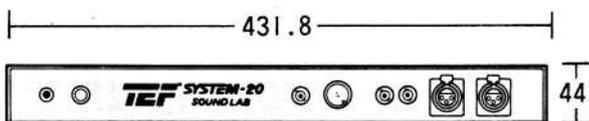


図25：3つのカーソルでRT₆₀反響時間がわかる

HARDWARE SPECIFICATIONS

プロセッサ	RAM64K×24、ノンプログラマブルROM、32K×24ビット、プログラマブルROM、8K×24ビット、
メモリー	モトローラXSP56001ZL27
D/Aコンバーター	16ビット、8倍オーバーサンプリング
A/Dコンバーター	16ビット、64倍オーバーサンプリング(2ch同時サンプリング)
データフォーマット	IEEEフローティングポイント
電氣的仕様	
周波数特性	10Hz~21KHz ±0.2dB(ライン、DC結合)
位相特性	10Hz~21KHz ±1.0dB(ライン、DC結合)
ダイナミックレンジ	96dB
THD	-85dB(1kHz)
トリガーコネクター	
コネクター	4ピンDIN
電圧レベル	TTLコンパチブル、DC0、5Vロジックレベル
最大電流	24mA
マイク入力	
入力数	2、ソフトウェアにて選択
カップリング	ACのみ
コネクター	3ピンXLR、#2ホット
ゲイン	ソフトウェアにて0~60dB、4段階調節
入力インピーダンス	6.81kΩ
最大入力電圧	1V RMS
ポーラライジング電圧	0+48V内部ジャンパー選択
ライン入力	
入力数	2、ソフトウェアにて選択
カップリング	AC/DCスイッチ切り換え
コネクター	BNC
入力インピーダンス	DC:2MΩ、AC:1MΩ
最大入力電圧	1V RMS
テスト出力	
コネクター	BNC
レベル	1V RMS(±5mV)フロントパネルにて可変
ソースインピーダンス	0~50Ωフロントパネルにてスイッチ設定
コントロール類	電源スイッチ、電源インジケータ、レベルインジケータ、リセットスイッチ、オーバーロードインジケータ
その他	
寸法	432W×44H×314D(mm)
重量	4.73kg
動作温度	0~55°C
推奨PC	PCバージョンのソフトウェア、アプリケーションはMS-DOSシステムにおいてのみ動作。 (3.1以上、EGA、VGAグラフィックス使用)
マイクロプロセッサ	20MHz、386、マス・コプロセッサ
RAM	最小1MB、推奨2MB
モニター	VGA高解像度カラーモニター(EGA、中解像度VGAも可)
ハードディスク	最小40MB、推奨80MB
インターフェース	RS-232シリアルポート(ボーレート57.6)
推奨マッキントッシュ	マッキントッシュIIシリーズ、SE30
ファインダー、システム	6.0.3以上
RAM	2MB(4MB、マルチファインダー付)
ハードディスク	最小40MB、推奨80MB レーザーライターを含むアップル全シリーズをサポート



※ デモ機の用意がございます。お気軽にご連絡下さい。

- TEF-20 PC仕様 ¥ 985,000.-
- TEF-20 Mac仕様 ¥ 985,000.-
- TEF-20 Both仕様 ¥ 1,045,000.-

TEFシステム導入実績

TEFシステムは、以下のとおり世界中のサウンドシーンで測定機のスタンダードになっています。

ラスベガス・ヒルトン	合衆国規格局
カーペンターズホーム教会	バイオニア・エレクトロニクス
スーパードーム	トランプ・カジノ
マーキュリー・レコード	ABC
NBC	ショウコ
ナショナル・パブリック・ラジオ	ノートルダムACC
ボイズ州立大学	国際特殊オリンピックス
ブラクフンク	テルコ・エレクトロニクス
キャティラック自動車事業部	ラスコリーナス・スタジオ
クライスラー・コーポレーション	メリーランド・スタジオ
ジョージア技術物理学院	マクダネル・ダグラス・コーポレーション
フォード自動車工業	ヒューズ航空機
JBL	AT&T
CBS	ステーブ・ミラー・バンド
シュア・ブラザーズ	バーデュー大学
ナッシュビル・ネットワーク	ボストン・アコースティクス
エレクトロボイス	コミュニティ・ライト&サウンド