

広帯域音響信号処理へのデジタル技術の導入

山崎 芳男* ・ 伊藤 毅*

1. まえがき

近年のコンピュータおよびそれを支えるデジタル集積回路の性能の向上と価格の低減には目を見張られるものがあり、好むと好まざるとにかかわらず、あるいはそれを使用者が気付くか否かは別として、我々の身近にデジタル化の波が押し寄せつつある。

音響の分野も他聞にもれず、LSI 化された音声合成装置が玩具にまで使われたり、PCM テープレコーダ、デジタルオーディオディスクやデジタル測定機器などハードウェアのデジタル化が進んでいる。一方、電子計算機によるソフトウェア処理は音声の分析、合成の研究に早くから使われていた。特に 1965 年に J. W. Cooley と J. W. Tukey によって FFT のアルゴリズムが紹介されると、音声の研究は飛躍的な発展を遂げた。建築音響の分野でも電子計算機を使った室内音場のシミュレーションや測定データの解析は 1960 年代から行われていた。建築音響測定では特に FFT とデジタルフィルタが汎用電子計算機のソフトウェア処理あるいは測定機器にハードウェア、マイクロプロセッサの形で盛んに利用されている。

音響機器のデジタル化は、放送やレコード、ホールの拡声など業務分野で 1970 年頃から始まった。当初はアナログ伝送系の隘路を、価格の上昇やハードウェアの複雑化をある程度容認した上で、デジタル化して質の向上を図るという形の導入が主であった。

アナログ音響機器の現状はハードウェア技術がほぼ飽和点に達しており、これ以上の向上をアナログ的手法で追及すると、大幅な価格の上昇あるいは重量や容積の増大を招き、時代の流れに逆行する恐れもある。デジタルハードウェアの処理速度と集積度の向上、消費電力と価格の低下を背景に、1980 年代は、高品質、低コストを追及した当然の帰結として家庭用音響機器もデジタル化され、さらにデジタル信号処理の特長を生かした新しい形の音響処理が実用化される時代となる。

早稲田大学音響工学研究室においても、1968 年頃から広帯域音響信号のデジタル信号処理及びそれに必要な

理論的検討や実験を手掛けてきた。これらを大別すると、

(1) 建築音響測定、室内音場シミュレーション等建築音響関係のソフトウェア処理

(2) 音響機器測定へのデジタル信号処理技術の導入

(3) 測定、処理装置、デジタル録音機等ハードウェアの設計、製作

(4) 情報量に着目した広帯域音響信号の最適符号化法の検討

(5) 広帯域音響信号のデジタル伝送に適した誤り制御方式の検討

(6) 信号と雑音の分離、歪や伝送特性の補正等の適応型フィルタリング、準同形フィルタリング

(7) 広帯域音響信号の AD, DA 変換の精度向上に関する理論的検討および実験

等々となる。

本稿では音響工学、特に広帯域音響信号を扱う分野へのデジタル信号処理技術の導入を概観し、建築音響測定について行っている研究の一部を紹介する。

2. デジタル信号処理の特長と問題点

2.1 デジタル信号処理

信号処理の目的は雑音と信号の分離、劣化した信号の復元などのフィルタリングと、測定や評価に必要なパラメータの抽出にある。

デジタル信号処理は信号をいったんデジタル化して数字列で表現し、その数字列を処理する操作である。その歴史をたどると基盤概念の多くは 17 世紀に発展した数値解析に端を発している。しかし、デジタル信号処理が隆盛を極めるに至った要因は 1940, 50 年代の標本化定理をはじめとする情報理論の発展と、電子計算機の実用化といえる。

シャノンは 1948 年に信号の単位時間当たりのエントロピーより大きな伝送容量を持つ伝送系、処理系を使えば、あいまい度を限りなく小さくできる符号化法が存在することを明らかにした。音響信号はアナログ信号であり、そのエントロピーは無有限大である。あいまい度のない伝送、処理をするには無有限大の伝送容量を必要とする。しかるに、現実のハードウェアには必ず雑音が存在

* 早稲田大学理工学部電子通信学科

し、伝送容量は有限である。したがって「伝送、処理された信号には雑音、誤差が加わり、あいまい度を含むことになる。すなわち、信号は多かれ少なかれ伝送、処理過程で劣化する。

信号をデジタル化するとエントロピーは有限な値となる。したがって、デジタル化の際発生するあいまい度さえ認めれば、伝送容量の有限な処理系を使っても劣化のない伝送、処理が期待できる。これはデジタル信号処理の大きな特長で、系の質は基本的には標準化周波数と量子化特性、演算語長によってのみ決まる。質の点から見たデジタル化の採否は、アナログ処理による劣化の総量とデジタル化の際生ずる劣化との比較により決定すべきものといえる。

音響測定においてもアナログ測定では質の高い測定を行うには熟練を要するのに対し、デジタル信号処理では誰が何時行なっても同じ結果が期待できる。測定技術者が頻繁に替わらざるを得ない大学の研究室にとってはこの点もデジタル技術導入の大きな魅力である。

広帯域音響信号を扱う分野へのデジタル技術の導入を大別すると、

- (1) コンピュータによる信号解析
- (2) アナログ処理、アナログ機器のデジタル化
- (3) 新しいシステムの構築

となる。これは必ずしも歴史的な流れに対応するわけではないが、例えば建築音響測定では当初は電子計算機による信号処理が行われ、次第に性能、操作性の向上あるいは価格の低減を図った測定機器単体のデジタル化が始まった。最近では、測定および処理時間の短縮、新しい評価パラメータの抽出、あるいは将来の活用を考慮してできるだけ生に近い形でデータの保存といった観点から新しい形の建築音響測定システムが生まれようとしている。

2.2 デジタル信号処理の問題点とその対策

2.2.1 量子化と量子化雑音

アナログ信号をデジタル化するには標準化と量子化の操作が必要である。一般に音響信号の周波数帯域は有限であるから、標準化定理に基づき情報の欠落のない標準化が可能である。

一方、量子化は連続分布する標本値を離散的な値で表現する操作であるから、情報の欠落は不可避である。この量子化出力と入力標本値との差を量子化雑音と呼ぶ。

広帯域音響信号を量子化する場合には、多くの量子化ステップの間を素早く往き来するような入力信号に対しては、量子化雑音は入力とは無相関な白色性の雑音となる。しかし、入力レベルが低く量子化ステップ数が少な

い信号、あるいはたとえ入力レベルが高くとも極くゆっくり変化する信引に対しては、量子化雑音は入力と強い相関のある一種の歪となる。

ダイナミックレンジの広い音響信号を扱う場合、これらの量子化雑音による悪影響を軽減すべく、量子化ビット数は可能な限り多く設定する。しかし、広帯域音響信号のダイナミックレンジは100dBにも及び、小レベルに対して十分な量子化ビット数を与えるハードウェアの実現は困難である。

量子化雑音を白色化する目的で、ディザと呼ばれる量子化ステップ幅に一様分布する確率変数を量子化に先立ち信号に重畳し、最量化された信号からおなじディザを引き去る手法が知られている。この手法は画像¹⁾、音声²⁾の符号化については検討が加えられている。音響機器の現状は、必ずしもすべてのシステムにディザが導入されているわけではない。たとえ、導入されている場合でも、専らAD変換の際ディザの付加が行われるのみで減算は行われていない。ディザの減算を行わないと、量子化雑音の振幅は入力値に依存する。そのうえ、理論的に望ましい一様分布ではなく、ガウス分布の雑音がディザとして用いられている例が多い。

ところで、現実のAD変換器やDA変換器には、理想量子化特性からの誤差が存在する。この誤差は特に多数の桁の符号が変化するゼロ交叉近傍などに偏在する。このような変換器で量子化を行う場合、かなり振幅の大きいディザを重畳し、量子化された信号から同じディザを引き去る手法を導入することにより、誤差の分散、精度の向上が期待できる³⁾。これは、あるアナログ入力に対する量子化ステップが特定されることなく、広い範囲の量子化ステップが使われる結果、誤差が分散、平均化されるからである。

2.2.2 有限語長の影響

デジタル信号処理では有限語長の影響を常に考慮しなくてはならない。前節で述べた量子化雑音はデータ取り込み部での有限語長の影響である。

例えば、信号処理で重要な役割を果たすフィルタをデジタル化する場合、データや係数の語長の制約により雑音や誤差が発生し、厳密な意味ではアナログフィルタと等価の伝達関数を持つデジタルフィルタは実現できない。また巡回部分を持つIIR(Infinite Impulse Response)型デジタルフィルタでは巡回部分の有限語長の影響で、減衰すべき出力がある値に収束してしまうリミットサイクルとよばれる現象が生ずる。リミットサイクルで決まるある範囲を往復する三角波の発振現象を呈することもある。

ところで、音響信号処理はデータの取り込み、処理、出力部に大別される。処理過程での有限語長演算による信号劣化は避けられないが、データ取り込み部で既に有限語長化されているうえ、次の出力部にも語長の制限があるので、処理過程での有限語長の影響が出力に現れないよう演算語長を設定することは可能である⁴⁾。

このように有限語長の影響は、語長を十分長くすることにより解消されるが、ハードウェアに制約のある場合も多い。いずれにしても、デジタル信号処理は、有限語長との戦いに尽きるといっても過言ではない。

3. 近接4点法による室内の空間情報の把握

本章では早稲田大学音響工学研究室において手掛けている近接した4点で収録したインパルス応答から室内の空間情報を把握する手法について紹介する。

3.1 建築音響測定

現在広く行われている建築音響測定は多岐にわたり、大別すると残響特性、音圧分布や明晰度等の室内音響特性、遮音特性、騒音や振動の測定等となる。

これらの建築音響測定は決して一朝一夕に確立されたものではなく、有史以来の人間と音とのかかわりと100年になんなんとする建築音響学の歴史が、信号処理技術の進歩と測定機器の性能向上に支えられて熟成したものといえる。

デジタル技術の導入は建築音響測定にも大いに貢献している。特にアナログ信号処理で問題の多い波形記憶や遅延はデジタルハードウェアの最も得意とするところである。電子計算機でオフライン処理を行う場合、記憶装置としてテープレコーダやデータレコーダが使われるが、伝送特性や操作性に問題が多い。テープレコーダをデジタル化したPCMテープレコーダは測定用録音機、電子計算機への音の入力装置として今や不可欠な存在となっている。

一方、デジタル信号処理のソフトウェアにおいて中心的な役割を果たしているのはFFTとデジタルフィルタである。FFTは建築音響測定の分野においても、調和解析の手段としてはもちろん、たたみ込み演算をはじめ多くの演算の手段として広く使われている。デジタルフィルタも様々な構成法が提案され、設計通りの特性が必ず得られるので、アナログフィルタに代わってハードウェアとしても実用に供され始めている。

3.2 平均化操作による伝送特性測定精度の向上

建築音響測定を大別すると騒音測定のように音場にある音を専ら收音、分析するいわば受動的な測定と、残響時間測定のように刺激音を提示したうえで收音し、その

応答から結果を求める能動的測定とがある。

後者については、系が線形、時不変であればその系の伝送特性はすべてインパルス応答、あるいは周波数応答で表現できる。したがって、系のインパルス応答か周波数応答が正確に把握できれば、いかなる入力に対する応答も計算により求められる。すなわち、後処理に必要な測定パラメータを計算することができる。サンプル音とのたたみ込み演算により、被測定系を通った音を聴くことさえ可能である。

アナログ的手法では、主として雑音の影響でインパルス応答や周波数応答を十分な精度で収録することが困難である。そのうえアナログ演算で任意の入力に対する応答を計算することは不可能であり、測定項目毎に最適な提示音、処理方法が採られているのが現状である。

デジタル信号処理ではインパルスは単位サンプルに置き換えられ、その数学的な取扱いはむしろ明快になる。デジタル計測は時間精度が高いうえ、劣化のない記憶が可能のため、単位サンプル応答が十分減衰する時間以上の間隔で単位サンプルを提示し、その応答を加算することによりSN比の改善された単位サンプル応答を得ることができる。この手法は同期加算とよばれる。なお、一定の周期で同期加算を行うと、周期性の雑音は軽減できないが、同期加算の周期を必要最低限の間隔を確保したうえでランダム化することで、周期性の雑音に対しても同期加算の効果が得られる。

また、周波数領域で入力のパワースペクトル密度と入出力間のクロスパワースペクトル密度との比から直接系の周波数応答を求めることもできる。この場合、パワースペクトル密度、クロスパワースペクトル密度をそれぞれ長時間平均することにより、SN比の改善された周波数応答が得られる。

これらはいずれも、加算することにより信号成分の電力が4倍になるのに対して、ランダム雑音の電力は2倍にしかならないという性質を利用したものである。平均化の回数は暗騒音の量に依存する。理論的には暗騒音の影響が測定系の量子化雑音レベル以下になるまで行う。

3.3 近接4点法による空間情報の把握

前述のように線形、時不変な系では、一本のインパルス応答を収録、保存しておけば必要に応じて測定パラメータを求めることができる。新しい測定法が開発されれば、その時点であらためて測定することなくパラメータを求めることができる。

筆者らは数少ないデータの収録、保存で空間情報の把握までできないものかと考え、マクロに見た一点に近接する4点のインパルス応答をデジタル信号処理して空

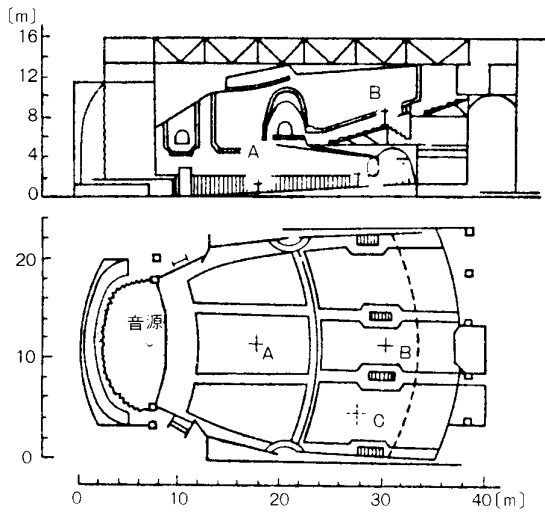


図1 早稲田大学大熊行動の概要と測定点

間情報を分析する実験を行ってきた⁵⁾。この手法は、室内の一点から発せられたインパルスが壁面等で反射されて近接した4個の受信点へ到来するまでの時刻を相関処理等で求め、その到来時間差に着目して4受信点からの距離を計算し、空間上に反射音の仮想音源となる1点を決定、その座標と反射音の形を使って、受信点から見た空間情報、音響的に見た建物の等価的な形状等を求めようというものである。

この手法は原理的には、次々に到来する反射音で構成されたインパルス応答から個々の反射音を信号処理によって分離できる初期反射部分にしか適用できないが、100ms程度までについてはある程度の情報が得られる。

3.4 測定例

空間情報の表示方法としては、仮想音源の分布図、方向別の時間経過図など色々考えられるが、ここでは受信点から見た反射音の到来状況、方向、時刻や強さを示す反射音パターンを紹介する。

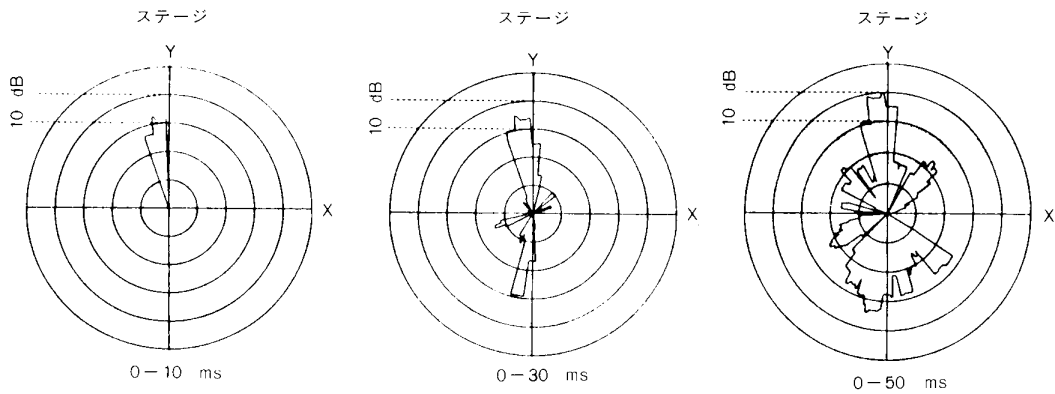


図2 2階中央(測定点B)の水平(X-Y)面反射音パターンの時間変化(回転方向仮想マイクロホン開き角 ± 10 度, 垂直方向 ± 45 度)

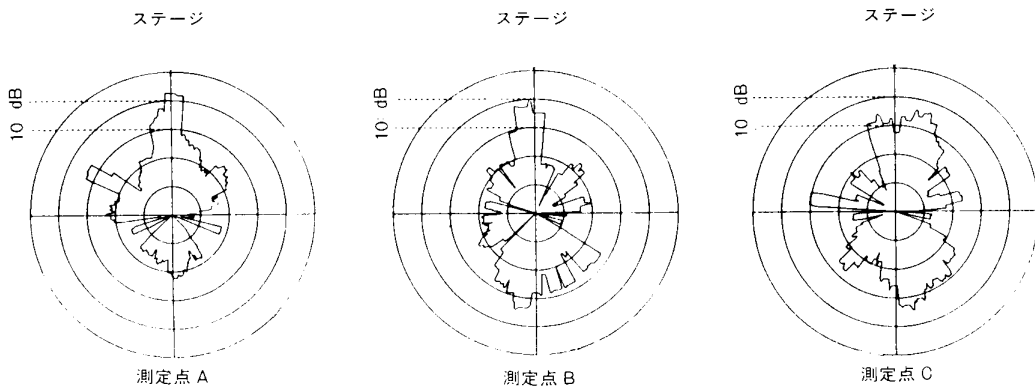


図3 測定点による水平(X-Y)面反射音パターン(0~55ms)の違い

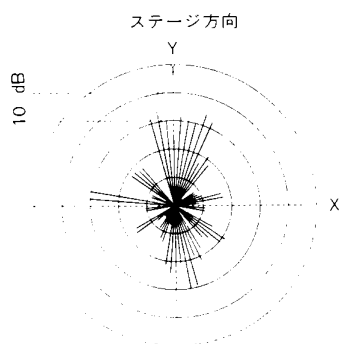


図4 測定点B水平(X-Y)面反射音パターン(回転方向 ± 5 度,垂直方向 ± 15 度)

図1に早稲田大学大隈講堂での測定例を示す。インパルス応答の収録は、あらかじめ測定系の逆特性を、PCMテープレコーダに間隔をランダムに数百回録音しておく、現場ではこれを再生し、マルチチャンネルPCMテープレコーダでその応答を収録、後処理で同期加算したものである。図2は2階中央において、反射音(全帯域)の量と到来方向とを時間の経過とともに示したものである。図3には測定点による、水平、垂直方向の反射音パターンの比較を示す。図2,3とも仮想マイクロホンの回転方向の開き角は ± 10 度、回転面に垂直方向の開き角は ± 45 度とした。

仮想マイクロホンの開き角は狭くすると、いわゆるはりねずみパターンあるいは指向拡散度を求めることもできる。図4に回転方向の開き角を ± 5 度、垂直方向の開き角を ± 15 度としたときのB点の0~30msの反射音パターンを示す。

この測定手法を筆者らは最近、近接4点法と呼んでいる。実験段階を一步踏み出した程度であるが、少なくとも初期反射音部分では受音点から見た空間情報をかなり正確に把握することができる。今後、鏡像法等の音場のシミュレーションとの組合せ等も検討していきたい。

4. む す び

以上、広帯域音響信号のデジタル信号処理について概説した。デジタル技術が広帯域音響信号を扱う音響工学の分野に導入され始めて20年近くの歳月が流れた。一部の研究、業務分野では既に実用域に達しており、今後ますます広い範囲に浸透するものと思われる。特に実時間適応処理の導入により音および音場制御の受動処理から能動処理への脱皮が期待できる。

一方、デジタルオーディオの現状はどちらかというところハードウェアが先行した形となっている。現行のアナログオーディオシステムは、音を作る、伝送する、受け取るそれぞれの立場の人々が、長い年月をかけて試行錯誤した結果得られた合意と見ることができる。デジタルオーディオもソフトウェアに携わる人々、ユーザーを含めた合意が得られてはじめて、システムとして定着するといえよう。

その日が一日も早からんことを祈って筆を置く。

参 考 文 献

- 1) L.G.Robert, "Picture Coding Using Pseudo-Rand-Random Noise," IRE Trans., IT-8, No. 2 (February 1962), pp.145-154.
- 2) N.S.Jayant and L.R.Rabiner, "The Application of Dither to the Quantization of Speech Signals," B.S.T.J., 51, No. 6, (July-August, 1972), pp.1293-1304.
- 3) 山崎芳男,西鳥羽 貴,伊藤 毅, "広帯域音響信号の量子化へのディザの適用" 電子通信学会電気音響研究会資料, EA 82 21, (1982, 6).
- 4) 姫野卓治,塚田利夫,山崎芳男,伊藤 毅, "イコライザ用デジタルフィルタの演算精度について," 日本音響学会講演論文集, pp.579-580, (1981, 5)
- 5) 山須田 繁,小路法男,安川謙一郎,斎藤博之,山崎芳男,伊藤 毅, "デジタル技術を用い