

建築音響測定へのデジタル技術の応用 *

山 崎 芳 男 **

(早稲田大学理工学部)

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.Coolley 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のは周知のとおりである。

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。

また、関連技術を利用した各種の測定や、1965 年に M.R.Schroeder が提唱したインパルス積分法による残響特性の測定なども、測定機器を工夫してアナログ処理により行われていた。これらの測定は本質的にデジタル信号処理に向いており、1960 年代から電子計算機や専用ハードウェアを使ったデジタル技術の導入が盛んに試みられてきた。

建築音響測定へのデジタル信号処理の導入はある意味では、同じ工学の分野にありながら最も距離があるともいえる二つの技術の融合が要求される。

一部にはアナログ処理とデジタル処理を対比させて、その優劣を論ずる向きもある。しかし、音響信号はまぎれもなくアナログ信号であり、デジタル信号処理はあくまでも手段、道具として使いこなすべきもので、本来比較して論ずるといった性格ものではない。

しかるに、未消化のまま導入されたため、的確な処理を施せば、阻止、軽減できるデジタル信号処理特有の雑音、誤差が放置されている例も見受けられる。

本稿ではデジタル信号処理を建築音響測定に導入する利点、問題点およびその対策について解説する。

なお、建築音響における諸測定技術については、本誌 32 巻 10 号に橘 秀樹氏の解説がある。本稿では具体的な測定方法については重複を避け、2, 3 の解説に止める。

2. 建築音響測定とデジタル信号処理

2.1 建築音響測定

建築音響測定は人間の暮らしに不可欠な衣食住の住と五感の一つ聴覚にかかわる重要な測定で、建築音響測定として意識されていたか否かは別として、古くから行われていた音の面から見た建物の設計、評価の流れを汲むものと見ることができる。

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、音圧分布や明晰度などの室内音響特性、遮音特性、騒音や振動の測定などとなる。建築材料の吸音力、音響インピーダンス、音響透過損失や衝撃音遮断力の測定あるいは音場の評価も広い意味では建築音響測定といえる。

これらの建築音響測定は決して一朝一夕に確立したものではなく、前述の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である。

ところで建築音響測定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) 新しい測定システムの構築

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、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り、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

* Application of digital technique to architectural acoustic measurement.

** Yoshio YamaSaki (Waseda University, Tokyo, 160)

の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導入

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礎概念の多くは17世紀に発展した数値解析に端を発しているといえる。

しかし何といってもデジタル信号処理が今日隆盛を究める要因は1940, 50年代の標準化定理をはじめとする情報理論の発展と、デジタル計算機の実用化である。

シャノンは信号の単は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合化法が存在することを明らかにした。

建築音響測定で扱う信号は当然アナログ信号でそのエントロピーは無限大である。あいまい度のない伝送、処理をするには無限大の伝送容量を必要とする。現実のハードウェアには必ず雑音が存在し、伝送容量は有限である。従って伝送、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。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。

従って、建築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っても同じ結果が期待できる。これがデジタル技術導入の大きな魅力である。

3. デジタル信号処理の問題点とその対策

3.1 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。

建築音響測定で扱う広帯域音響信号の量子化では、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ごくゆっくり変化する信号に対しては、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。しかし建築音響測定で扱う信号のダイナミックレンジは100dBにも及ぶので、小レベルに対し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、信号にディザと呼ばれる確率変数を重畳したうえで量子化する手法が知られている。

理論的には量子化ステップ幅 Δ 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、量子化された信号から同じディザを引き去ることにより、量子化雑音を幅 Δ に一様分布する電力 $\Delta^2/12$ の白色性雑音とすることが可能である。

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。建築音響測定に使われるハードウェアの現状は、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。

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場合が殆どである。ディザ減算を行わないと、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差近傍などに偏在する。

ハードウェアで実際に量子化を行う場合、可成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。

3.2 有限語長の影響

デジタル信号処理では有限語長演算の影響を常に考慮しなくてはならない。

建築音響測定はデータの取り込み、処理、出力部に大別される。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。もっとも、広いダイナミックレンジを要求する建築音響測定ではAD変換器の変換精度にも問題があり、語長を長くするだけで解決できるわけではない。

処理部分では測定の目的に応じた様々な演算が行われる。アナログで複雑な演算をすると雑音により不確定な信号劣化が生じる。これに対しデジタルではどんなに複雑な演算をしても不確定な信号劣化はない。

特に処理部分は前過程のデータ取り込み部ですでに有

限語長化されているうえ、次の出力部も当然語長に制限があるので、原理的には演算語長を必要にして十分な長さを選べば処理過程での信号劣化は生じない。

現実にはハードウェアの制約から十分な語長が設定できない場合もある。この場合、アナログの不確定な信号劣化とは異なり、誤差は確定的なものとなる。これが利点となる場合もあるが、広帯域音響信号を扱う建築音響測定では前述の量子化雑音のように、誤差が入力信号と相関を示し測定結果あるいは聴感に悪影響を及ぼすことがあるので注意を要する。

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、宿命的な標本化周波数と語長の制約がある。これら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原理的に実現できない。

また、巡回部分を持つ IIR 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呼ばれる現象が生じ、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。

2 次のプレゼンス型 IIR フィルタについて考えてみよう。有限語長による雑音は周波数が低いほど顕著である。入出力の標本化周波数を 44.1kHz、語長を 16bit 固定小数点としたとき、Q を 2 とすると有限語長の影響が出力に生じないために必要な係数および演算の語長はフィルタの中心周波数が 1kHz のとき 25bit、20Hz では実に 36bit である⁴⁾。

ところで、フィルタの動作を入出力の標本化周波数と等しく設定すると、高い中心周波数に対して演算標本化周波数の影響で所望特性からのずれが生ずる。これは内部演算標本化周波数を入出力より高く設定することにより避けられるが、低い周波数に対する語長の影響は更に大きくなる。

このように、語長を十分長くとることにより有限語長の影響は理論的には解消されるが、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。

4. 建築音響測定へのデジタル技術の貢献

デジタル技術の導入は建築音響測定に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。

また、電子計算機でオフライン処理を行う場合、テーブルコードやデータレコードが使われるが、伝送特性や操作性に問題が多い。テーブルコードをデジタル化した PCM テーブルコードは測定用録音機として期待で

きる。

現作のところ放送やスタジオ向けの業務用あるいは家庭用 PCM テーブルコードは市販されている。測定用に使える電子計算機とのインタフェース機能を備えた、マルチチャンネルデジタルテーブルコードは特注、自作に頼らざるを得ない。

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不可欠なものとなっている。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、いまやアナログフィルタに代わってハードウェアとして実用に供され始めている。

FFT とデジタルフィルタについては、デジタル信号処理の基本的概念を構成するものであるが、その構成方法や精度の検討あるいは応用とすでに多くの文献に紹介されているので、ここでは建築音響測定に直接関係のある 2、3 のデジタル信号処理を紹介することにす

4.1 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。従って系のインパルス応答が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まる。すなわち、後処理で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る。むしろ測定項目ごとに最適な提示音、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いわゆる明快になる。デジタル計測は時間制度が高いうえ、劣化のない記憶が可能なため、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呼ばれる。

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、ランダム化すると、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夫々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べきである。

4.2 インパルス積分法による残響測定

前述のように 1965 年 M.R. Schroeder は音源停止後の残響波形の集合平均 $\langle s^2(t) \rangle$ が、インパルスあるいは帯域制限されたパルスに対する応答 $h(t)$ の自乗積分で求められることを示した⁵⁾。すなわち、

$$\langle s^2(t) \rangle = \int_0^\infty h^2(t) dt$$

となる。これはたった一回の測定で集合平均が得られる巧みな手法である。多くの人々により実用化が試みられた。積分範囲が $t \rightarrow \infty$ となっているのでアナログ的手法では何等かの工夫が必要である。

いったんテープレコーダに録音したパルス応答を逆転再生して $\infty \rightarrow t$ に自乗積分する方法や、

$$\int_0^\infty h^2(t) dt = \int_0^\infty h^2(t) dt - \int_0^\infty h^2(t) dt$$

なる関係を使って、パルスを二度提示して、一度目に全体を積分、二度目に までを引き去る手法などが試みられており、測定器として市販されているものもある。

しかし、結局アナログ的手法では単純な原理を複雑にしたうえ精度を落とす結果になってしまう。すなわち、前者にはテープレコーダの録音再生特性、測定時間に問題がある。後者にはパルスの再現性に不安がある。

デジタル技術を導入すると、劣化のない記憶が簡単にできるので、一度のパルス応答の収録で原理どおりの測定が可能である。従ってインパルス積分法はデジタル処理に向けた測定手法ということかできる。

平均化操作により単位サンプル応答が十分な精度で収録されてさえいれば、一本の単位サンプル応答から必要な帯域すべての集合平均された残響波形を求めることができる。すなわち、まず単位サンプル応答デジタルフィルタあるいはフーリエ変換して周波数領域で帯域制限したうえで、自乗積分すればよい。

なお、本測定法の測定誤差およびその対策についての

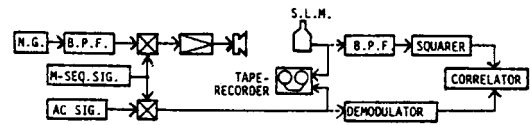


図-1 M系列変調法

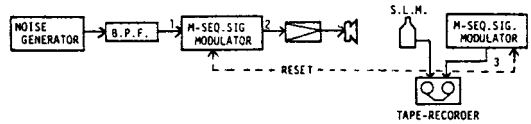


図-2 測定に先立ち同期をとるM系列変調法

議論がある。これは主に後半の残留雑音の影響で、単位サンプル応答のSN比が確保されていれば問題はないが、導入に当たっては十分留意する必要がある。

ところで、インパルス積分法では一点の残響波形の集合平均が求まる。川上、山口らは更に複数の点の単位サンプル応答を用いて空間の集合平均を求める手法⁶⁾を報告している。

4.3 相関手法へのデジタル技術の応用

相関による解析手法は建築音響測定に幅広く応用されてきた。相互相関関数などによる音場の評価のように直接使われる場合と、白色性雑音あるいはM系列などの擬似ランダム系列を使ってインパルス応答や残響時間などの測定の手段として利用する場合とがある。

いずれにしても、相関関数、相関係数の測定も遅延や乗算を伴うのでアナログ的手法よりもデジタル信号処理に向いているといえる。

デジタル信号処理を導入した相関手法による建築音響測定は枚挙にいとまないが、ここでは時間精度の高さを利用した鈴木、矢野、橘、石井らによるM系列変調相関法⁷⁾を紹介しよう。

M系列変調相関法は良く知られているように、白色性の雑音を比較的速度の遅いM系列信号で変調点した音源と、受音点で収音した信号の相関を求める手法である。

一般に図-1に示すように音源側と受音点側の同期ある同時録音が必要であり、これが運用上制約となる場合が多い。図-2に示すように音源側と受音側の測定装置を切り離し、夫々水晶発振器でM系列信号を発生させる。測定開始時に双方のM系列変調発生器を同時にリセットしてやれば、以後の受音側の行動は自由というわけである。

M系列変調相関法の変調速度は遅いので、水晶発振器の精度で実用上十分であろう。デジタル技術の基本的な特長を利用した巧みな手法といえよう。

4.4 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

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間情報を分析する実験を行ってきた⁸⁾。

近接した四つの受音点への同一反射音の到来時刻を相関処理などで求め、この差に着目して四つの受音点からの距離を計算し、空間上の一点、いわば仮想音源を決定、その座標と反射音の形を使って、受音点から見た空間情報、音響的に見た建物の等価的な形状などを求めようというものである。

この手法は原理的にインパルス応答から個々の反射音が信号処理により分離できる初期反射部分にしか適用できないが、0～100ms程度についてはある程度の情報が得られる。

空間情報の去示方法としては、仮想音源の分布図、方向別の時間経過などいろいろ考えられるが、ここでは受音点から見た反射音の到来状況、方向、時刻、強さを示す反射音パターンを紹介する。

図-3に示す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、予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き、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-4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共に示したものである。

図-5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。

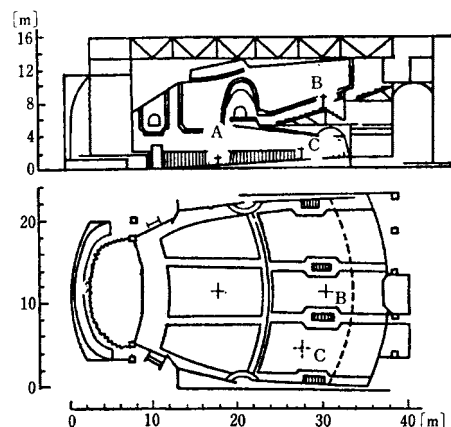


図-3 早稲田大学大隈行動の概要と測定点

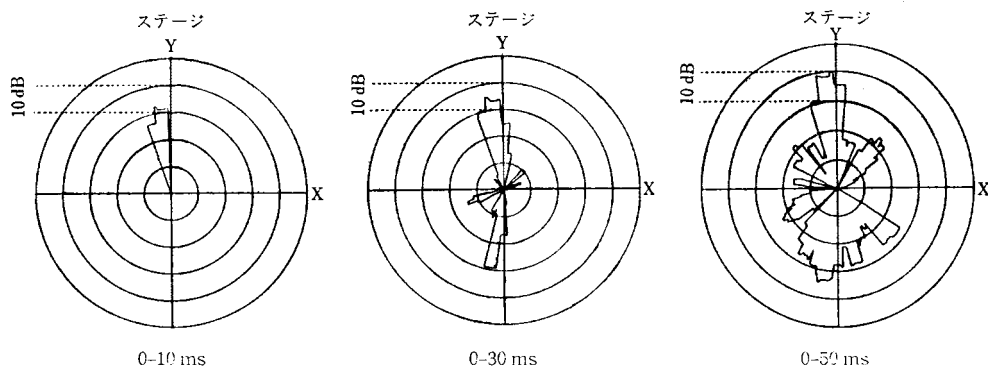


図-4 大隈講堂2階中央B点における反射音パターン（開口；回転方向 $\pm 10^\circ$ 垂直方向 $\pm 45^\circ$ ）

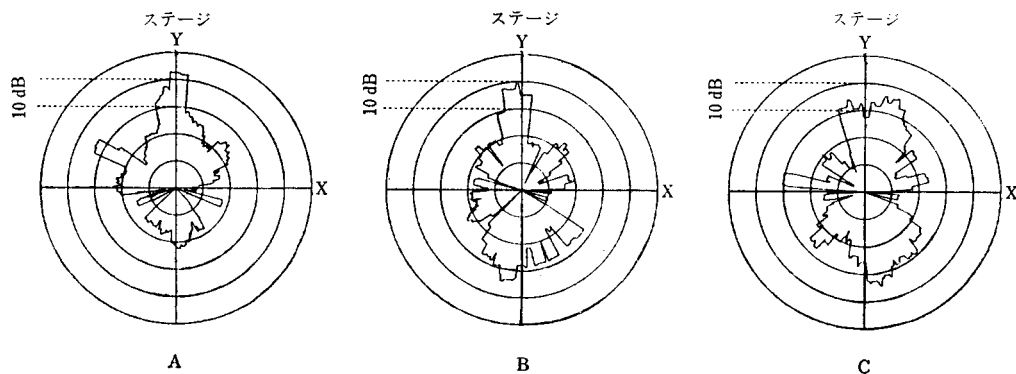


図-5 各測定点の反射音パターン（X-Y平面，開口；回転方向 $\pm 10^\circ$ 垂直方向 $\pm 45^\circ$ ）

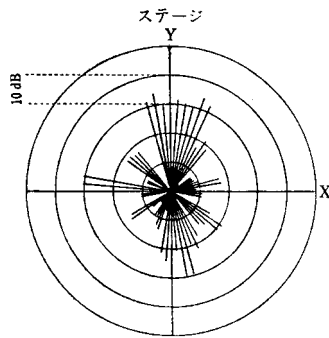


図 - 6 開き角を狭くした B 点の 0 ~ 40ms の反射音パターン (回転方向: X-Y 平面, 開口: 回転方向 $\pm 5^\circ$ 垂直方向 $\pm 15^\circ$)

図 - 4, 5とも仮想マイクロホンの回転方向の開き角は $+10^\circ$ 度, 回転面に垂直方向の開き角は $+45^\circ$ 度とした。

仮想マイクロホンの開き角を狭くすると, 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 - 6 に回転方向の開き角を $+5^\circ$ 度, 垂直方向の開き角を $+15^\circ$ 度としたときの B 点の反射音パターンを示す。指向拡散度 d は 0.56 であった。

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可成り正確に把握することができる。今後, 鏡像法などの音場のシミュレーションとの組み合わせなども検討していきたい。

本測定法とは全く原理は異なるが, 指向性スペクトル分析について, 城戸, 石亀, 張, 金, 安倍らは直線配列マイクロホン⁹⁾, 移動マイクロホン¹⁰⁾による測定を提案している。

5. む す び

以上, 建築音響測定へのデジタル技術の応用について解説した。

100 年の歴史を持ちほぼ確立しているともいえる建築音響測定に, 若い高々 30 年の歴史しかなく急速に発展しつつあるデジタル信号処理がとけこみ, 建築音響測定にますます貢献することを期待して筆を置く。

文 献

- 1) L.G.Roberts, "Picture coding using pseudo random noise," IRE Trans., IT-8 No.2, 145-154 (February 1962).
- 2) N.S.Jayant and L.R.Rabiner, "The application of dither to the quantization of speech signals," B.S.T.J., 51 (6), 1293-1304 (July-August, 1972).
- 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," 音講論集 579-580 (1981. 5) .
- 5) M.R.Schroeder, "New method of measuring reverberation time," J.Acoust.Soc. Am.37, 409-412 (1965).
- 6) 川上福司, 山口公典, "残響波形の空間集合平均," 電子通信学会電気音響研究会資料 EA79-14 (1979. 5) .
- 7) 鈴木千輝, 矢野博夫, 橋 秀樹, "現場測定における M 系列変調相関法の簡略化," 音講論集 59-60 (1980. 5) .
- 8) 山須田繁, 小路法男, 安川謙一郎, 斉藤博之, 山崎芳男, 伊藤 毅, "デジタル技術を用いた室内の空間情報の一測定法," 音響学会建築音響研究会資料 AA-79-03 (1979. 2) .
- 9) 安倍正人, 金 千徳, 城戸健一, "直線配列マイクロホンを用いた指向性スペクトル分析システム," 音講論集 269-270 (1979. 10) .
- 10) 石亀昌明, 安倍正人, 城戸健一, "移動マイクロホンを用いた指向性スペクトル分析システム," 音響学会誌 35 (6) . 308-313 (1979) .