

解説



音響と情報

5. 音環境の評価と測定[†]子 安 勝^{††}

1. 音環境の問題—騒音から快適音環境へ

古くから騒音は「文化・文明の所産」あるいは「都市活動のバロメータ」といわれ、時代とともに騒音は上昇の一途をたどるとされてきた。これは一面の真理を表していることであるが、一方では騒音が生活妨害の要因として注目される機会も多くなり、環境保全のための騒音防止の重要性が広く社会的に認識されるようになってきた。

我が国で騒音の問題が本格的に取りあげられたのは、第二次大戦後の混乱期を経て経済成長期に入った1950年代の後半になってからである。この時点では都市圏を中心にして、工場・事業場からの騒音、建設作業にともなう騒音や各種交通騒音が、周辺の住民生活に対して大きな影響を与え、公害の一つとして対応を迫られるようになり、各地方自治体における公害防止条例・騒音防止条例などによる騒音規制がスタートした。こうした法的規制の歩みは、1968年に制定された騒音規制法に集約されることになる。さらに1970年代に入ると各種環境騒音についての長期目標を示す「環境基準」が設定され、この面からの騒音問題処理の体制は整備されたことになる。アメリカの評論家が、日本の騒音問題の状況について“The Worst Noise, The Best Law”という言葉で総括したのは、この頃のことであった。

こうして、一時は危機的な状況にあるといわれた我が国の騒音問題も、1980年代になってようやく鎮静化に向かってきた。その背景としては、環境改善に対する住民の関心と、自治体など行政面の努力とともに、各種騒音低減技術の開発・実用化が大きな寄与をしてきたと言うことがで

きる。

こうした経過をたどって、最近の音環境の問題は、単に騒音に妨害されない環境というだけでなく、快適な音環境の創造に向けられることになっている。これらの音環境に対する関心は、直接には各方面からの環境騒音低減に対する努力の成果によって実現された静穏な環境が評価された結果であるが、その背景になっているのは、我々が古くから持ってきた音に対する優れた感性であると考えられる。

ただこうした音に対する感性は、その気候風土とそこでの生活様式とに密接に関係していると見てよいであろう。木造戸建住宅を中心とした以前の我が国の生活が、煉瓦造住宅を主体としたヨーロッパとは異なった音感性の形成に対する大きな要因になってきたとすることができる。このように考えると、近年の我が国における生活様式の大きな変化は、日本人の音感性に対しても少なからぬ影響を与えていると判断される。

2. 音環境の評価指標

2.1 環境騒音の評価

(1) 騒音レベル

環境騒音を含めて、現在一般に騒音評価の基本量として使われているのは、騒音レベル[A特性音圧レベル]である。これは、図-1に示されるA特性の周波数補正を行った音圧レベルで、単一数値指標として計測・表示も簡単であり、騒音に対する社会的な関心を高めるのに大きな寄与をしてきた。実際に環境騒音の測定方法についての国内規格JIS Z 8731(騒音レベル測定方法)や、国際規格ISO 1996/1(環境騒音の記述と測定—第1部：基本量と測定方法)では、すべて評価基本量として騒音レベルを採用している。

ただ図-1のA特性は、30~40 phonの「音の大

[†] Evaluation and Measurement of Sound Environment by Masaru KOYASU (Chiba Institute of Technology, Department of Computer Science).

^{††} 千葉工業大学工学部情報工学科

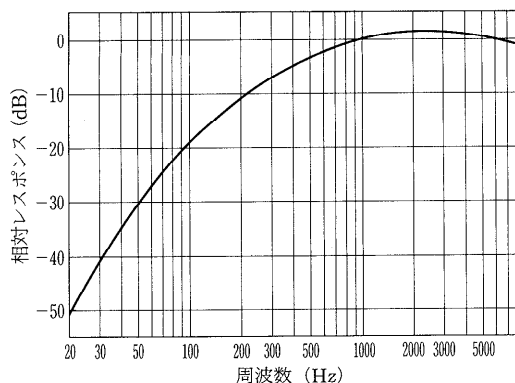


図-1 騒音計の A 特性周波数補正回路の基準レスポンス

きさのレベル」に対する等感曲線の逆特性をベースにしたものであり、この意味から騒音レベルは、音の大きさという一つの面からの騒音評価指標として理解すべきである。このため、最近の研究動向として、より包括的な騒音評価指標を求める努力が行われているが、簡略さなどの面からの騒音レベルの優位性は当分はゆるがえないものと判断される。

実際の環境においては、騒音レベルは時間的にさまざまな形で変化することが多い。この時間領域における騒音の性状は、評価の上で重要な意味を持っている。そのために、以前から時間変動を加味した騒音評価量についての多くの研究・提案が行われてきた。我が国では、計測上の便宜などを含めて 1950 年代から統計量としての中央値 (50% 時間率レベル) などが使われ、現在でも法規制や基準に適用されている。

これに対して、国際的には次式で定義される等価騒音レベルが、時間変動騒音評価の基本量として使われるようになっている。

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (\text{dB})$$

これは A 特性の重み付けをした音圧レベルの測定時間内でのエネルギー平均値として、物理的に明確な意味を持っている。さらに主観的な反応とも良い相関のあることが多くの研究によって明らかにされており、今後の一般的な騒音評価の基本量として使われるものと考えられる。

(2) 周波数スペクトル

騒音評価のもう一つの側面は、周波数領域の特性からの評価である。前項で示した騒音レベルはある程度は周波数領域の特性を考慮したものであ

表-1 騒音測定に使用する帯域フィルタの中心周波数と通過帯域

周波数 (Hz)					
オクターブ			1/3 オクターブ		
下 限	中 心	上 限	下 限	中 心	上 限
11	16	22	14.1	16	17.8
			17.8	20	22.4
			22.4	25	28.2
22	31.5	44	28.2	31.5	35.5
			35.5	40	44.7
			44.7	50	56.2
44	63	88	56.2	63	70.8
			70.8	80	89.1
			89.1	100	112
88	125	177	112	125	141
			141	160	178
			178	200	224
177	250	355	224	250	282
			282	315	355
			355	400	447
355	500	710	447	500	562
			562	630	708
			708	800	891
710	1 000	1 420	891	1 000	1 122
			1 122	1 250	1 413
			1 413	1 600	1 778
1 420	2 000	2 840	1 778	2 000	2 239
			2 239	2 500	2 818
			2 818	3 150	3 548
2 840	4 000	5 680	3 548	4 000	4 467
			4 467	5 000	5 623
			5 623	6 300	7 079
5 680	8 000	11 360	7 079	8 000	8 913
			8 913	10 000	11 220
			11 220	12 500	14 130
11 360	16 000	22 720	14 130	16 000	17 780
			17 780	20 000	22 390

るが、騒音の評価に対しては直接的に音圧レベルの周波数特性によって騒音の性状を表示することが重要である。

騒音の周波数特性を表示するときの帯域幅などについては、現在多くの種類がある。特に DSP 技術の進歩によって、フーリエ変換によるパワースペクトルの算出が実用化し、機械など騒音発生源の解析に強力な手法として利用されている。

ただ一般の環境騒音については、オクターブまたは 1/3 オクターブバンド音圧レベルによって周波数特性を表示することが多い。この場合、中心周波数としては、表-1 に示す系列が標準になっている。従来の測定では、125~4000 Hz (オクターブバンド) または 100~5000 Hz (1/3 オクターブバンド) の範囲が普通になっていたが、最近騒

音評価に対する低周波数域の重要性が指摘されることが多くなり、63 Hz (オクターブバンド) または 50, 63, 80 Hz (1/3 オクターブバンド) の測定が追加されることが多くなっている。

2.2 建築物の遮音性能評価

都市域を中心にして、集合住宅における生活が多くなるにしたがって、隣接する住宅からの騒音が大きな問題になっている。その対策の主体になるのは、界壁や外周壁の遮音性能であり、一戸建の住宅でも、交通騒音など外部騒音の対策には、外周壁の遮音が重要である。こうした建築物の遮音性能評価については、空気音と床衝撃音の2種類に区分して取り扱われている。

(1) 空気音の遮音性能評価

隣室や外部で発生した空気伝搬騒音に対する建物の遮音性能は、室間音圧レベル差、内外音圧レベル差などによって評価される。現在我が国ではオクターブバンド音圧レベル差の測定結果を評価基準曲線にあてはめて、それから単一数値指標 (D 値) を算出して評価する方法が使われており、その評価基準曲線 (図-2) は JIS A 1419-1992 (建築物のしゃ音等級) に規定されている。ただこの評価方法是对応する国際規格 (ISO 717) との整合が十分ではない。現在 ISO 規格の改正作業が行

われており、今後の重要な研究課題になっている。たとえば、オクターブバンド音圧レベル差の算術平均値が、音の大きさの面から見た評価に相当であるという結果も報告されている¹⁾。

(2) 床衝撃音の遮音性能評価

床衝撃音については、標準の衝撃源で床に衝撃を加えたときの下階室などにおけるオクターブバンド音圧レベルによって評価が行われている。この場合の評価基準曲線 (図-2) も、さきの JIS A 1419 に規定されている。この場合の基準曲線は、国際規格との整合性がまったくないといってもよく、次章で述べる衝撃源の問題とともに、今後の重要な課題になっている。

2.3 聴取環境の評価

音声、音楽など音の聴取環境としては、騒音が一つの評価尺度になることは経験的にも明らかである。駅のプラットホームに電車が入ってきたときや交差点などで、電話や会話が騒音によって中断されることは、日常よく経験することである。

こうして、騒音に影響されない環境は、音の聴取に対する前提条件であるが、それに加えて室内などでの音の聞こえが重要な条件になる。この問題は、音楽ホール、劇場、講堂などにおける基本的な課題として、古くから音響工学の主要な研究

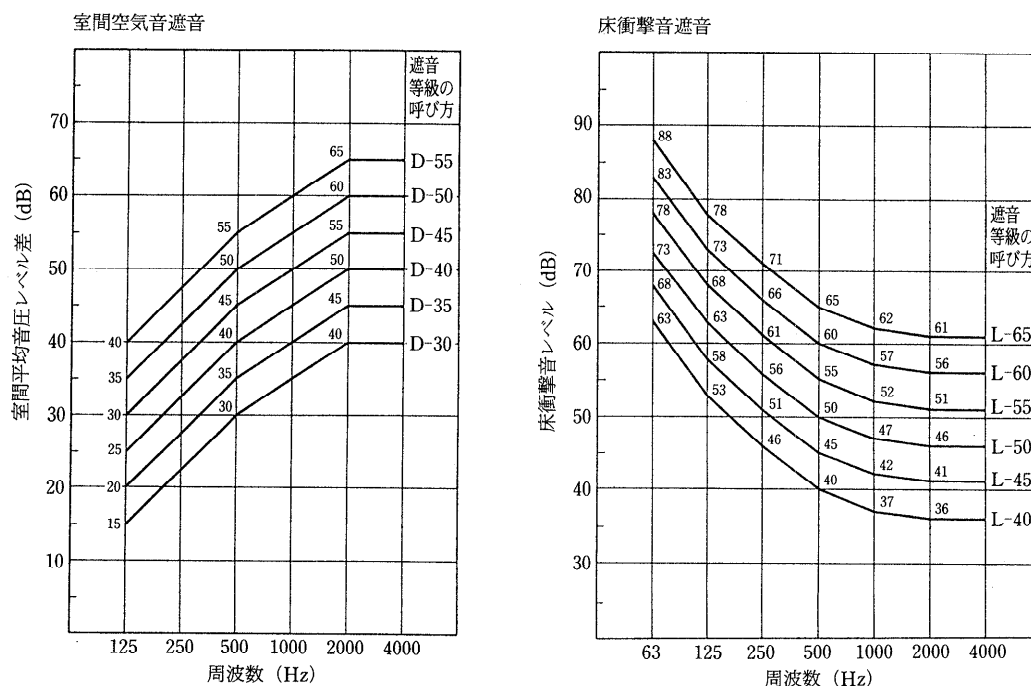


図-2 建築物の遮音性能評価の基準曲線 (JIS A 1419)

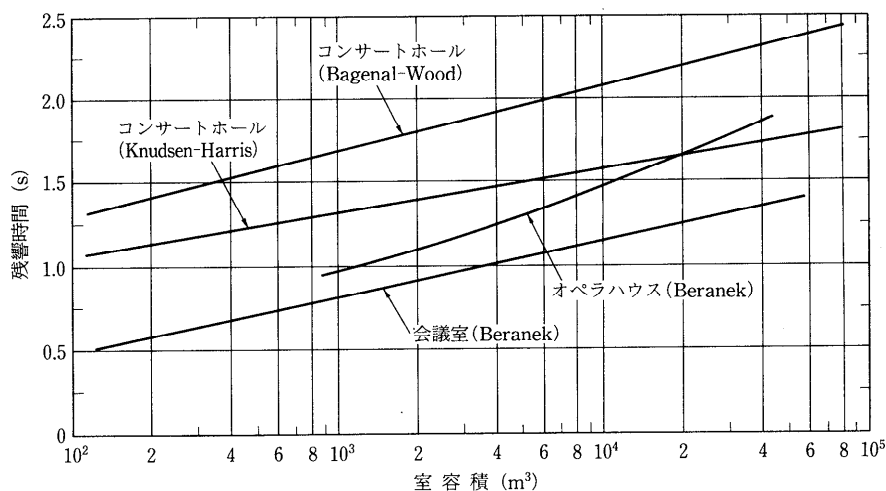


図-3 室用途別の最適残響時間の例 (500 Hz)

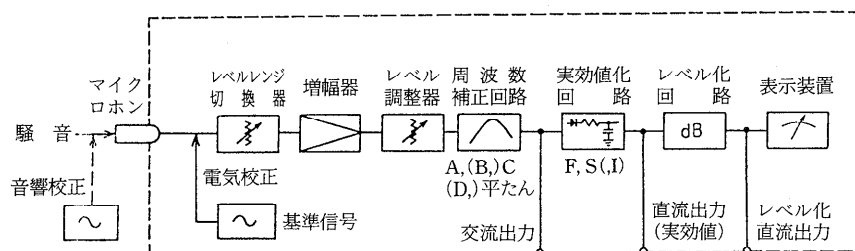


図-4 騒音計の基本的な構成ブロック図

対象になってきた。W. C. Sabine の残響理論²⁾ からちょうど 100 年が経過しているが、このとき確立された残響時間の概念は、現在でもオーディトリウムの音響特性評価の基本量として使用され、聴取対象となる音の種類や室の大きさなどに応じて、最適残響時間を設定し、これを目標にして室の音響設計が行われている。図-3 に最適残響時間の一例を示しておくが、この他にもこれまで多くの提案が行われている。この事実は、残響時間の最適値は時代などに応じて変化することを示すものであり、実際の設計には、これを考慮した目標値の設定が必要であることを示している。

ところで、室の音響特性の評価に対しては、残響時間だけでは不十分であることも明らかにされており、残響時間を補足する各種評価量の検討が行われている。この場合の基本になるのは、室の物理的な音響特性は、インパルス応答によって完全に記述されるという原理であり、DSP 技術をベースにした正確なインパルス応答の計測技術の進歩によって、実用化してきたものである。本稿

でそれらの詳細にふれる余地はないので、文献などを参照されたい³⁾。

3. 音環境の測定手法

前章に示した各種音環境評価指標の測定方法について、その概要と最近の技術動向などをハードウェアとソフトウェアの両面から示す。

3.1 騒音レベルの測定

騒音レベルの測定には、普通には騒音計が使われる。騒音計の仕様は、JIS C 1502-1990 (普通騒音計) および JIS C 1505-1987 (精密騒音計) の 2 種類の日本工業規格で規定されている。ここでの規定は、対応する国際規格 IEC 651 の規定とはほぼ整合がとれている。

これらの規格に規定されている騒音計の基本的な構成を図-4 に示す。騒音計の主要な特徴は、(1) A 特性などの周波数重み付けをするための周波数補正回路、(2) FAST および SLOW の動特性 (時定数) を与える二乗検波回路の 2 つの部分で代表される。

騒音計を使った環境騒音の騒音レベル測定方法すなわち測定点・測定時間の選定、データの処理方法などは、JIS Z 8731-1983 (騒音レベル測定方法、対応する国際規格は ISO 1996) に規定されている。

騒音計のマイクロホンを対象点に設置し、アナログまたはデジタル表示された騒音レベルを読み取る。実際に環境騒音の騒音レベルは、時間領域でさまざまな形で変動する。そのため、従来はレベル記録器によって、記録紙上に騒音レベルの連続記録をし、これから必要なデータ処理をする方法が主として使われてきた。最近では、ここにも DSP 技術が適用されている。すなわち、騒音計の出力を A/D 変換して取り込み、各種のデータ処理を行って評価量を算出する方法が使われる。これらの信号処理は、コンピュータ・ソフトウェアの形で行われるが、実用的な処理装置としては、その機能を組み込んだ騒音計や、騒音計の附属装置として作られているものもある。代表例として、等価騒音レベルの測定に対して国際規格 IEC 804 がある。さきに示した 2 種類の騒音計 JIS 規格にも、附属書の形で規定が行われている。

3.2 騒音の周波数分析

前章で説明したように、環境騒音の周波数特性測定に対しては、オクターブまたは 1/3 オクターブバンド音圧レベルが使われることが多い。この場合の分析装置の仕様は、JIS C 1513-1983 (オクターブおよび 1/3 オクターブバンド分析器) に規定されている。これに対応する国際規格としては、IEC Pub. 225 がある。ただしこれらの規格は、アナログ形フィルタを前提にしたものであり、最近のデジタルフィルタを含めて規定の見直しが必要であることが指摘されている。すでに IEC 規格の全面改正の作業が進められており、近い将来に IEC 1260 として制定される段階に達している。

3.3 建築物の遮音性能測定

(1) 空気音遮音測定

空気音遮音性能測定方法は、JIS A 1417-1974 (建築物の現場における音圧レベル差の測定方法) に規定されている。測定の原則は、音源室に設置したスピーカからオクターブバンドノイズを放射し、音源、受音両室の平均音圧レベルを測

定して、これから室間平均音圧レベル差を算出する。

遮音性能測定の国際規格 ISO 140 シリーズには、現場における空気音遮音については、上記 JIS に対応した 140-4 の他に、140-5 (外周壁および外周壁部材の遮音測定方法) がある。これら国際規格と JIS 規格とでは、細部の相違だけでなく、評価量としての基本的な考え方に大きな違いがある。すなわち、JIS では建築物の空間性能をそのまま表示することを目的とした測定方法を規定している。これに対して、ISO 規格は受音室の吸音条件を標準化したときの音圧レベル差を表示するもので、界壁などの部位性能の現場測定方法を規定するものである。この 2 種類の遮音性能表示の考え方は、それぞれに意味のあるものであり、今後の検討課題となっている。

なお、現在 ISO において短時間遮音性能測定方法 (簡易法) 規格の作成作業が進められている。これは、我が国の現場でも強く要請されているものであり、新しい技術を適用した測定方法の開発が期待される。

(2) 床衝撃音遮音測定方法

床衝撃音の遮音測定には、古くからタッピングマシンとよばれる標準衝撃源が使われてきた。これは重さ 500 g の鋼製ハンマを 4 cm の高さから時間間隔 100 ミリ秒で自由落下させて、床に衝撃を与えるものである。タッピングマシンは本来靴音をシミュレーションするために開発されたものであるが、衝撃力が過大で床の種類によっては非線形の影響によって、的確な評価ができない可能性のあることが指摘されてきた。

さらに我が国の集合住宅では、素足の生活が多いために、床衝撃源としては子供の跳びはねや走り回りなどが指摘されることが多かった。そのため、JIS A 1418-1978 (建築物の現場における床衝撃音レベルの測定方法) では、タッピングマシン (軽量衝撃源) に加えて重量衝撃源が規定されている。このように重量衝撃は、我が国で発達してきたものであるが、最近欧米でも “soft and heavy impact” の呼び名で検討され、国際規格に取り入れようとする動向にある。これに対応して、我が国では新しい重量衝撃源の開発研究も行われている⁴⁾。

4. 聴取環境の測定

4.1 室内音響特性の測定

従来の室内音響特性の測定は、測定項目ごとたとえば残響時間、音圧分布、エコータイムパターンなどの項目ごとにそれぞれ単独の測定として実施されてきた。この方法は、現在でも多くの現場測定で使われており、測定システムの精度も大幅に向上している。

ただ室内音場を線形・時不変性のシステムと仮定すれば、その物理特性は、室のインパルス応答から算出できるので、最近ではまず対象室のインパルス応答を測定し、これから各種の室内音響評価量を算出することが多くなっている。

(1) インパルス応答の測定

室のインパルス応答を測定するためには、次にあげるいくつかの方法が使われている。

a) 近似的に δ 関数と見なせるインパルス音源を用いる直接的な方法

b) M 系列変調ノイズを音源として、相互相関技術を利用する方法⁵⁾

c) 時間伸長パルス (スイープパルス) を音源として使用し、受信信号に逆フィルタリング処理を行ってインパルス応答を算出する方法⁶⁾

実際に直接法、時間伸長信号法の場合には、S/N を改善するために、平均応答法 (同期加算平均) を適用することが多い。

ホールのインパルス応答の測定結果の一例を、図-5 に示す。

(2) 室内音響評価量の算出

インパルス応答の測定結果から算出される主要な室内音響評価量と、算出の基本的な手順などを表-2 にまとめておく。詳細については、文献 3) を参照されたい。

これらの物理評価量の算出には、通常は全指向性マイクロホンを使ったインパルス応答の測定結果が使用されるが、評価量によっては、単一指向性・双指向性マイクロホンが使用される。さらにダミーヘッド・マイクロホンを使って測定した 2 チャンネルのインパルス応答にドライソースをたたみ込み、聴感実験による評価を行うことも多い。

4.2 音声聴取明瞭度の測定

室内における音声の聴取明瞭度の測定には、以

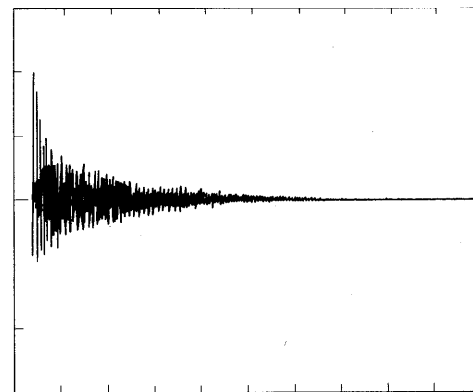
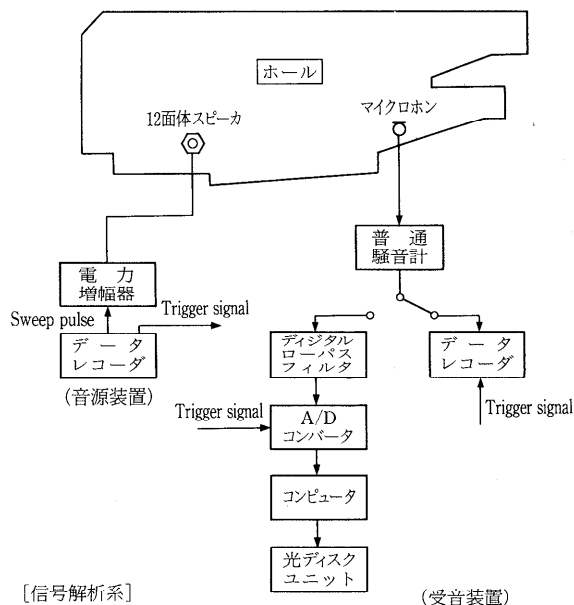


図-5 室のインパルス応答測定システムと測定結果の例

前は直接に各種音表を読み上げて、正確に聞き取られた割合を算出する方法が使われてきた。これに対して、物理測定によって明瞭度試験結果に対応する評価量を算出する方法が開発され、広く使われるようになってきている。

これは MTF-STI 法と呼ばれる方法で、まず室内で音源から聴取位置までの伝送路について、暗騒音を含めた MTF (Modulation Transfer Function) を、中心周波数 125~8000 Hz の各オクターブバンドごとに測定し、これから音声明瞭

表-2 残響時間を補足する主要な室内音響評価量

評価量	音源	定義または算出式
D 値 Deutlichkeit	短音	$D = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p_i^2 dt}{\int_0^\infty p_i^2 dt}$ p _i : 瞬時音圧
R 直接音成分対分散音エネルギーレベル差	短音	$R = 10 \log \left[\frac{\int_0^{50\text{ms}} p_i^2 dt}{\int_{50\text{ms}}^\infty p_i^2 dt} \right]$
C Clarity	短音	$C = 10 \log \left[\frac{\int_0^{80\text{ms}} p_i^2 dt}{\int_{80\text{ms}}^\infty p_i^2 dt} \right]$
時間重心	短音	$t_s = \frac{\int_0^\infty t p_i^2 dt}{\int_0^\infty p_i^2 dt}$
初期残響時間	短音または断続定常音	音源停止後の室内の音のエネルギー密度が、定常状態に対して 10~15 dB 減衰するまでの減衰時間を残響時間に換算した値
LE Lateral Efficiency	短音	$LE = \frac{\int_0^{80\text{ms}} p_{Li}^2 dt}{\int_0^{80\text{ms}} p_{oi}^2 dt}$ p _{Li} : 側方反射音の音圧 p _{oi} : 全方向から到来する反射音音圧 (直接音を含む)
RR Rom Response	短音	$RR = 10 \log \left[\frac{\int_{25\text{ms}}^{80\text{ms}} p_{Li}^2 dt + \int_{80\text{ms}}^{160\text{ms}} p_{oi}^2 dt}{\int_0^{80\text{ms}} p_{oi}^2 dt} \right]$

度に対応する STI (Speech Transmission Index) を算出する方法である。またこれを簡略化した RASTI (Rapid STI) も実用されている。これら STI や RASTI の測定においても、DSP 技術が中心的な役割をはたしている。詳細は文献 7) を参照されたい。

5. む す び

各種音環境の評価、測定方法について、その発展の経緯を含めて現況の概要を解説した。ここに見られるように、音環境の問題は、多くの場合に人間の心理を基盤にした複雑な問題であるが、音響測定に対するデジタル信号処理技術の適用によって、音環境の物理性状の把握は、アナログ技術の範囲では現実的に不可能であったような測定を含めて、飛躍的な発展をしている。そして、今後さらに大きな発展が期待されている。

参 考 文 献

- 1) Tachibana, H. et al.: Validity of Arithmetic Average of Sound Pressure Levels in Octave Bands as a Loudness Index, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 14, pp. 197-204 (1993).
- 2) Sabine, W. C.: Collected Papers on Acoustics (1921).
- 3) たとえば、永田 穂編著：音響工学講座 3，

建築音響，57 p.，コロナ社，東京 (1988)。

- 4) Tachibana, H., Tanaka, H. and Koyasu, M.: Heavy Impact Source for the Measurement of Impact Sound Insulation of Floors, Proceedings of Inter-Noise 92, pp. 643-646 (1992).
- 5) Berkhout, A. J., de Vries, D. and Boone, M. M.: A New Method to Acquire Impulse Responses in Concert Halls, J. Acoust. Soc. Am., 68, pp. 179-183 (1980).
- 6) Aoshima, N.: Computer-Generated Pulse Signal Applied for Sound Measurement, J. Acoust. Soc. Am., 69, pp. 1484-1488 (1981).
- 7) 中島立視：音声の明瞭度指標 (STI) の測定，日本音響学会誌，49, pp. 103-110 (1993).

(平成 6 年 12 月 12 日受付)



子安 勝

1927 年生，1950 年東京大学第二工学部物理工学科卒業。同年 (財) 小林理化学研究所入所，同所長，(有) 音響工学研究所所長を経て，現在千葉工業大学情報工学科教授。理学博士 (東京大学)。建築音響，騒音制御，音響計測などの研究に従事。著書「吸音材料」(技報堂出版，1976) ほか。日本音響学会，日本騒音制御工学会各会長歴任。日本音響学会「佐藤論文賞」受賞 (3 回)。日本音響学会，日本騒音制御工学会，日本建築学会，ASA，INCE/USA 各会員。