



屋外拡声システムの評価におけるインパルス応答

佐藤, 逸人
大島, 俊也
栗栖, 清浩

(Citation)

日本音響学会誌, 76(3):164-171

(Issue Date)

2020-03-01

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2020 一般社団法人 日本音響学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007974>



小特集—インパルス応答を「測る」「聴く」「創る」—

屋外拡声システムの評価における インパルス応答*

佐藤 逸人 (神戸大学)**・大島 俊也 (空港支援機構)***・栗栖 清浩 (TOA)****

43.28.-g; 43.38.Tj; 43.58.Gn

1. はじめに

本稿では、屋外拡声システムの評価におけるインパルス応答について解説する。

屋外では音の伝搬経路が時間変動するため、屋内のように正確なインパルス応答を測定することはできない。本稿ではその不正確さを前提としてインパルス応答を用いた評価を議論するという位置づけをご理解願いたい。

次に、本稿における「屋外拡声システム」について述べる。夕方5時ごろに屋外にいますと、「みなさん、家に帰る時間です」といった放送や、「夕焼け小焼け」のような時刻を知らせるメロディがどこからともなく聞こえてくることがある。これらの放送は「防災行政無線」と一般に呼ばれるシステムを使って行われる。このシステムは防災、応急救助、災害復旧に関する情報を伝えるため設置されているが、システムが正しく作動するかを確認する目的もあって、このような定時放送が行われている。

防災行政無線には、同報系と移動系の2種類があるが、本稿では同報系について取り扱う。同報系防災行政無線のシステムの仕組みを図-1に示す。まず、市役所などに設置された親局から、音を無線通信で子局に伝送する。音を高所から広範囲に放射するために、子局は15m程度の高さのポールや櫓（やぐら）とそれに取り付けられた無線通信の受信・復号装置及び拡声装置で構成されることが多い。子局から放射された音は、スピーカの性能、周辺の障害物の有無、気象条件に依存し一概には言えないが、数百m先まで届く。

本稿では、この同報系防災行政無線のシステムを屋外拡声システムと表記する。なお、競技場、遊園地、自然公園等でも屋外で拡声システムが運用されているが、各スピーカまでの音の伝送が有線接続になる等の違いはあるものの、本稿の内容の多くはそれらのシステムにも当てはまると考えられる。以降、2章では屋外拡声システムの性能評価に影響する要因とインパルス応答の関係について述べ、3章では屋外拡声システムのインパルス応答の測定について実例を交えて述べる。

2. 屋外拡声システムの性能評価に影響する要因とインパルス応答の関係

2.1 屋外拡声システムの性能評価

屋外拡声システムの性能の評価方法、つまり屋外拡声システムが音による情報をどれだけ正しく情報の受け手（聴取者）に伝えられるかを定量化する方法について考えてみよう。

屋外拡声システムに入力された音がひずむことなく聴取者まで伝送されれば、その屋外拡声システムは最高の性能を持つことになる。しかし、実際には伝送の途中で情報を含む音（信号音）が減衰したり、妨害音が増えたりする。聴取者に届く音のうち、信号音の聴き取りに有効な音と妨害音のエネルギーの比率を求めることができれば、屋外拡声システムの性能を定量化することができる。インパルス応答には、このエネルギーの比率の計算に必要な情報が多く含まれている。

ただし、屋外拡声システムに入力された信号音自体が聴き取りにくいものであれば、いくらシステムの性能が高くても、聴取者に正しく情報を伝えることができない。実際に、親局から生放送で情報を伝送する場合、発話者とマイクとの距離や発話の強さが適切でないために、拡声された放送が聴き取りにくくなるようなことがあるようである。また、親局から子局への無線通信を行う際にも、ア

* Impulse response in the evaluation of outdoor acoustic mass-notification systems.

** Hayato Sato (Kobe University, Kobe, 657-8501)
e-mail: hayato@kobe-u.ac.jp

*** Toshiya Ohshima (Organization of Aircraft Facilitation, Tokyo, 105-0011)

**** Kiyohiro Kurisu (TOA, Takarazuka, 665-0043)

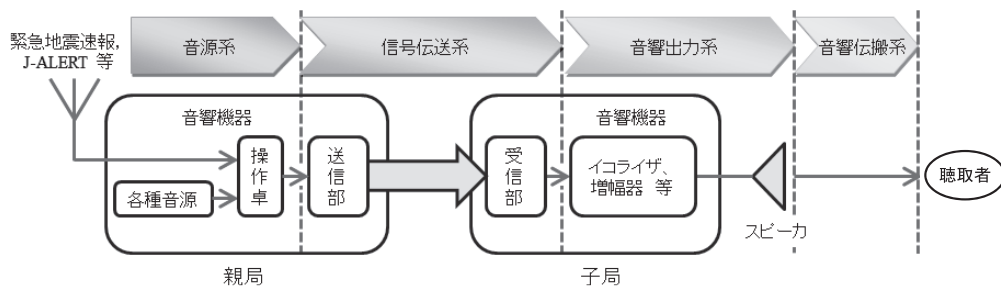


図-1 屋外拡声システムの構成モデル図

ナログ方式では雑音の混入、デジタル方式では人の音声の特徴を考慮した符号化¹によって、子局の拡声装置に入力される音が変わる。これらの要因の影響はインパルス応答では評価できないため、以下では子局のスピーカから聴取者の位置（聴取点）までの音の伝搬経路（図-1の音響伝搬系）を評価の対象とする。

2.2 評価に影響する要因

屋外拡声システムのスピーカから放射された信号音は、以下の(1)から(3)の要因により音圧レベルが減衰して聴き取りにくくなる。(1)は周波数に依存しないが、(2)と(3)は高い周波数で減衰量が多いという特徴がある。

- (1) 距離減衰
- (2) 空気吸収
- (3) 障害物による遮蔽

また、以下の(4)から(6)の要因により、妨害音が聴取者に届く。具体的には(4)と(5)の要因による残響音やエコー、更に(6)の要因による騒音が妨害音となり、信号音が聴き取りにくくなる。

- (4) 人工物や自然物（樹木、地形など）による反射
- (5) 複数の子局からの音の重畳
- (6) 道路交通騒音などの暗騒音

これらの要因の影響は、スピーカ近傍（例えばスピーカ軸上1mの地点）と聴取点のインパルス応答をそれぞれ測定することにより評価できる。

(1)から(3)は、スピーカ近傍で測定したインパルス応答と比較して聴取点におけるインパルス応答の第1音（最初に到来する音）がどの程度減衰しているかを分析²すれば評価できる。

¹音楽やサイレンのような音声以外の音の場合、符号化方式によっては音程が外れる等の品質劣化が生じる場合がある。

²スピーカの指向性の影響を受けない評価を行うためには、スピーカ、その近傍における測定点、聴取点を一直線上に配置して測定する必要がある。

(4)と(5)は、第1音を含む初期に到来する音（第1音からの遅れ時間が50ms程度）とその他の音のエネルギーの割合を聴取点におけるインパルス応答から算出すればその影響を定量化できる。ただし、特に複数の子局からの音が聴取点に到来する場合、第1音よりも遅れて到来した音の方が強くなり、その音が信号音の明瞭性を決定することがある。このような場合の評価方法については、文献[1]が参考になる。

(6)はインパルス応答そのものには関係ないが、屋外拡声システムの性能評価においては重要である。屋外拡声システムの運用時におけるスピーカ近傍での信号音の音圧レベルが既知であれば、二つのインパルス応答の相対関係から聴取点における信号音の音圧レベルの予測が可能であり、暗騒音の音圧レベルとの差を分析することにより(6)の影響を評価できる。

2.3 気象の影響

屋内では音の伝搬経路が時間によらず一定であると仮定できることが多いが、屋外では気象の影響が大きくそのような仮定はできない。

気象の影響は多岐に渡り、2.2節で述べた(1)から(6)の要因すべてが何らかの形で影響を受ける。気温と湿度が空気吸収に及ぼす影響[2]や、音の長距離伝搬における気温と風速の垂直方向の分布の影響[3]は詳細に研究されている。降雨あるいは降雪については、大気中を伝搬する音に対する影響は小さく無視できる程度[4,5]であるが、地表面の含水量が変わったり雪が積もったりすると吸音率が変化する[6,7]ため、主に反射音の影響が変わることが考えられる³。

上述した大局的な気象条件の影響はある程度予測できるが、音の伝搬経路における局所的な風の

³音の伝搬経路以外の影響として、牧ら[8]はスピーカへの雪の付着によってスピーカからの直接音の音圧レベルが20dB程度低下することを示している。

影響は時間変動も速く、予測はほぼ不可能である。音源から聴取点方向に風が吹く順風の場合、風速の垂直方向の分布によって音が下向きに屈折するため聴取点に到達する信号音が強くなり、また音の媒質である空気が聴取点方向に動くため信号音が聴取点に早く到達する。逆風の場合はこの逆で、信号音が弱く、遅く到達する。屋外では風速と風向きが時々刻々と変動するため、結果としてインパルス応答を構成する個々の音の振幅だけでなく時間構造も揺らぐことになる。更に、スピーカと聴取点の距離が長くなるほど、局所的な風の影響は積分されて大きくなり、測定結果の揺らぎが大きくなると考えられる。

以上より、インパルス応答とそれに基づく拡声システムの評価は、屋外では音源と聴取点の位置が同じでも測定するたびに異なると考えなくてはならない。実際に、気象の影響により音声了解度が大きく変わる [9] ことが報告されている。従って、理想的には、様々な気象条件で定点測定を行い、評価がどの程度の範囲に収まるかを把握する必要がある。

3. 屋外拡声システムのインパルス応答の測定事例

3.1 屋内における測定と異なる点

屋内における測定と異なる点として、音の伝搬経路長が数百 m 程度になること、音の伝搬経路が不安定であること、暗騒音の時変動が大きいこと、周辺住民への配慮が必要であることが挙げられる。

伝搬経路長が長く測定信号の音圧レベルが大きく減衰することと暗騒音の時変動が大きいことから、測定における SN 比、つまり測定信号と暗騒音の音圧レベル差を確保することが難しくなる。屋内であれば、暗騒音の音圧レベルが低い夜間に測定を行うことも可能だが、屋外では近隣住民に対する配慮が必要であるため夜間の測定は不可能である。更に、音の伝搬経路が不安定であることから、インパルス応答の同期加算による SN 比の改善は期待できない。従って、雑音に対して頑健な測定法を用い、できるだけ大きい音量でスピーカから測定信号を放射することが必要になる。

雑音に対して頑健なインパルス応答の測定法として Swept-Sine 法が挙げられる。Swept-Sine 法の詳細については、文献 [10] や文献 [11] を参照願

いたい。屋内では通常の Swept-Sine 信号で問題なく測定できることが多いが、屋外では Logarithmic Swept-Sine (以下、Log-SS) 信号 [12] を用いることが第 1 選択肢として考えられる。Log-SS 信号を用いることにより、暗騒音の音圧レベルが高い低周波数帯域における SN 比の改善や、スピーカへの過大入力による高調波ひずみを除去し易い⁴という利点がある。

Swept-Sine 信号の最適な継続時間については、一概には決定できない。継続時間を長くするほど SN 比の改善が期待できるが、その一方で音の伝搬経路の時間変動に長くさらされることになるため、必要以上に測定信号の継続時間を長くすることは避けなければならない。

なお、スピーカから遠い聴取点では空気吸収により高周波数帯域でも SN 比が低くなるため、Log-SS 信号では測定が難しい場合も考えられる。周波数帯域ごとに見た SN 比が一定になるように最適化した Swept-Sine 信号として、Band-wise Minimum Noise Swept-Sine (BMN-SS) 信号 [13] が提案されている。BMN-SS 信号では事前測定が必要だが、必要な SN 比を定めれば測定信号の継続時間が必要十分な長さに最適化されるという利点もあり、こちらも選択肢として考えられる。

また、屋外拡声システムの子局には、空気吸収によって減衰する高周波数帯域を予め増幅しておくための周波数補正装置 (イコライザ) が内蔵されている場合がある。音声は高域減衰型の周波数特性を持つが、測定信号は一般に周波数特性が平坦であるため、音声よりも高周波数帯域が相対的に強くなる。従って、子局内の拡声装置に測定信号を直接入力すると、内蔵されたイコライザによって高周波数帯域のパワーアンプやスピーカへの入力が過大となり、最悪の場合、拡声装置を破壊してしまう危険性がある。既設の子局を測定に利用する場合は、イコライザの有無を事前に調査し、イコライザがあつてこれをバイパスできない場合は、測定信号の再生レベルを徐々に上げながらパ

⁴Swept-Sine 信号には周波数が時間と共に上昇する周波数上昇型とその反対の周波数下降型の二つがある。Log-SS 信号を用いると高調波成分は主応答と時間的に分離して測定されるが、屋外におけるインパルス応答の時間長を考えると、高調波成分が直接音よりも時間的に前に現れる周波数上昇型の方が高調波ひずみを除去する上で有利である。

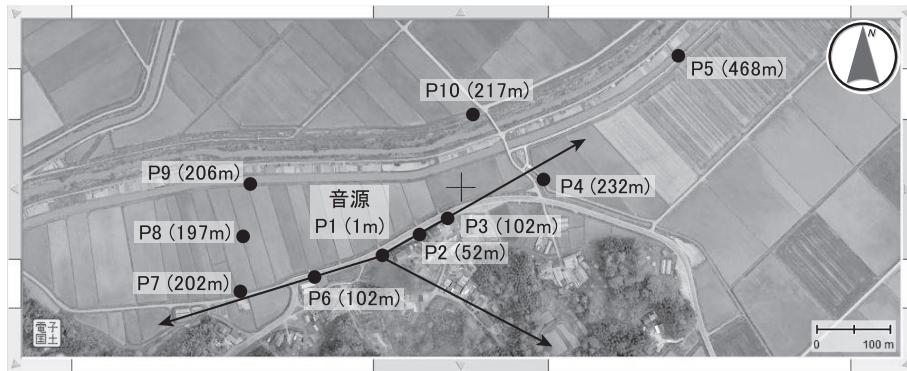


図-2 音源と測定点の配置（図中の矢印はスピーカの取り付け向き）

ワアンプの入力電圧や出力電圧を確認することが必要である。

屋外において Swept-Sine 信号のようなサイレンに似た音を大音量で再生すると、非常事態が発生したと周辺住民が誤解し、驚きや不安を与えることになる。従って、事前に音を鳴らす理由とその時間について周辺住民に周知徹底することが必要不可欠である。このような周辺住民へのストレスを避ける方法として、定時放送を利用したクロススペクトル法によるインパルス応答の測定 [14] も提案されている。

クロススペクトル法を屋外拡声システムのインパルス応答の測定に適用する場合、子局の拡声装置に入力される音（入力信号）と、その信号がスピーカから放射されて聴取点まで伝搬した音（出力信号）の二つが必要である。入力信号は、親局から送信された無線通信を受信機で受信することにより取得する⁵。定時放送を利用する場合、音声や音楽が入力信号になる⁶。クロススペクトル法の詳細については、文献 [15] を参照願いたい。

クロススペクトル法ではある一定の長さの時間窓をシフトさせながら入力信号と出力信号を切り出すことを繰り返し、入力信号と出力信号のクロススペクトル及び入力信号のパワースペクトルの平均をそれぞれ計算する。しかし、屋外では音の伝搬経路が不安定であることから、時間窓を長く

したり平均回数を多くすることが正確なインパルス応答の推定につながるとは限らない点に注意する必要がある。

3.2 Swept-Sine 法を用いた測定事例

平成 23 年度総務省第 3 次補正予算による「多様な通信・放送手段を連携させた多層的な災害情報伝達システム研究開発」[16] において実施されたインパルス応答の測定 [17] を例として紹介する。

図-2 に音源位置と測定点を示す。音源は既設子局のスピーカであり、3 個の折返しホーン（レフレックスホーン）スピーカが図中の矢印の方向に向けて取り付けられていた。この子局のパワーアンプに測定信号を直接入力することにより、スピーカから各測定点までの音の伝搬経路のインパルス応答を測定した。測定時における子局付近の気温は 21°C から 22°C、風速は 1 から 2 m/s 程度、風向は西南西であった。ただし、当然ながら音の伝搬経路全体で同様の風が吹いていたかは不明である。

周波数上昇型の Log-SS 信号（サンプリング周波数 48 kHz、約 22 秒）を測定信号とし、合計 8 回の測定を連続して行った結果を図-3 に示す。図-3(a), (b), (c) は、それぞれ P2, P3, P5 におけるインパルス応答である。500 Hz を中心周波数とする 1/1 オクターブバンド帯域における結果である。これらの測定点はスピーカの軸上ないしそれに近い位置にあり、スピーカとの間に障害物が無いので直接音が届く。スピーカから最も遠い P5 においても、500 Hz 帯域における測定信号と暗騒音の SN 比は 20 dB 程度と十分確保できていた。縦軸は P1（スピーカ軸上 1 m）におけるインパルス応答のピーク値を基準とした音圧レベルである。

周囲の地形は概ね平坦だが、いずれの測定点においても直接音に後続するパルスが多く見られ、子

⁵無線通信がデジタル方式の場合、受信した信号を復号するためには専用の機器が必要になり、この方法での入力信号の取得が不可能な場合がある。この場合、屋外拡声システムの設置者等に依頼して入力信号のデータを入力する必要がある。

⁶入力信号に含まれる周波数成分に対してのみインパルス応答が得られる。また、入力信号が強い周期性を持つ場合、その周期に相当する遅れ時間の位置に本来は存在しないパルスが生じてしまう。

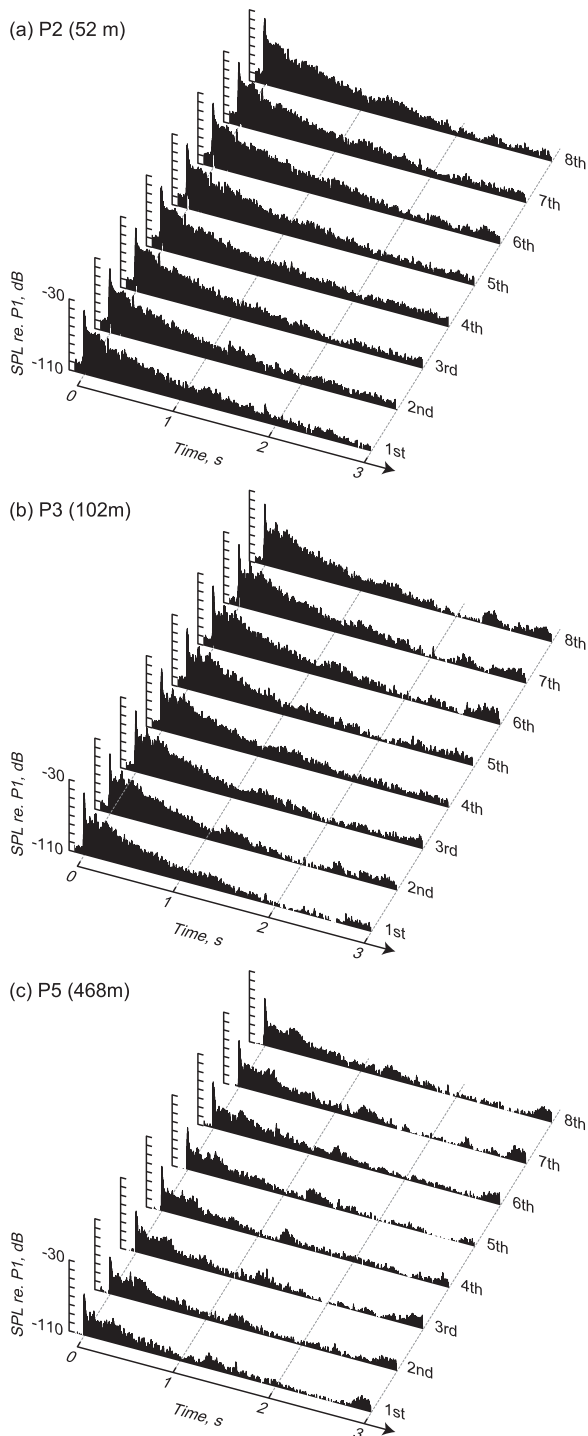


図-3 各測定点におけるインパルス応答 (500 Hz, 1/1 オクターブバンド)

局の南にある人工物（住宅）と自然物（樹木，丘）からの反射の影響だと考えられる。8回の測定を測定点ごとに比較すると，インパルス応答の概形としては大きな差は見られない。その一方で個々のパルスに着目するとやはり揺らぎが見られる。

揺らぎの例として，P1から各測定点までの直接音の減衰量をそれぞれのインパルス応答から求めた結果を図-4に示す。ここでは，インパルス応答

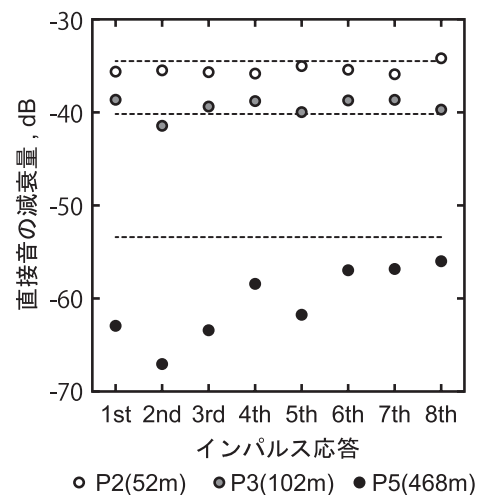


図-4 インパルス応答から算出した直接音の減衰量（破線は距離減衰の理論値）

のピークから ± 5 ms の範囲のパルスの 2 乗積分値を直接音のエネルギーと見なした。図中の破線は，それぞれの測定点までの距離減衰の理論値を示す。

スピーカからの距離が 100 m 程度以下の P2 と P3 では測定間の差は小さく，最大値と最小値の差はそれぞれ 1.7 dB と 2.8 dB であった。また，P2 と P3 では距離減衰の理論値が直接音の減衰量とほぼ一致している。500 Hz における空気吸収は，気温 20°C の場合，1 km 当たり 3 dB 弱（ただし湿度 20% 以上）であるため，100 m 程度の距離であれば無視できる。従って，P2 と P3 では，直接音については風の影響を受けずに比較的正確な測定ができていたと考えられる。

一方，スピーカから 468 m と遠く離れた P5 では減衰量にばらつきが見られ，最大値と最小値の差は 11.1 dB と大きくなった。また，距離減衰の理論値よりも最大で 14 dB 程度過剰に減衰する場合があったが，これは空気吸収で説明できる量ではない。この結果は，音の伝搬距離が長くなると，風によって測定結果が大きくばらつくことを如実に示している。

3.3 クロススペクトル法による測定事例

3.2 節で紹介した測定は気象が安定した条件で行われたが，2.3 節で述べたように様々な気象条件で測定を行うことが理想的である。本節では，周辺住民にストレスを与えずに長期間の定点測定が可能なクロススペクトル法による測定事例を紹介する。

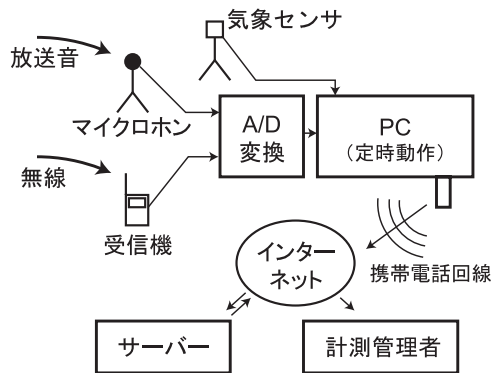


図-5 屋外拡声システムの長期無人計測システム

屋外拡声システムを対象としたクロススペクトル法によるインパルス応答の測定事例としては、森ら [14] によるものがある。森らは、Swept-Sine 法とクロススペクトル法の測定結果を比較し、卓越する反射音について、直接音を基準とした相対的な音圧振幅と遅れ時間が概ね一致することを示した。

また、大島ら [18] は7か月の長期定点測定を行い、複数の子局からの拡声音が日によってどの程度異なるかを調査した。ここでは、気象条件による測定結果のばらつきについて示すために、大島らの事例を詳しく紹介する。

この事例では、図-5 に示す長期無人計測システムを測定点に設置し、定時放送（継続時間 60s のピアノ曲）について、親局から送信された無線通信を受信機で受信したものを入力信号、マイクロホンで録音したものを出力信号として、両者を2チャンネル同時に録音した。

この事例では、含まれる周波数が限定される入力信号を用いた場合でも、測定点に到来する音の遅れ時間と強さを分析できるように、式 (1) で定義される周波数重み関数 $\psi(f)$ を用いた一般化相互相関関数 $R_{GCC}(\tau)$ を用いて検討している。

$$R_{GCC}(\tau) = \mathcal{F}^{-1} [\psi(f)G_{xy}(f)] \quad (1)$$

ただし、 $\mathcal{F}^{-1}$ はフーリエ逆変換、 f は周波数、 τ は入力信号に対する出力信号の遅れ時間、 $G_{xy}(f)$ は入力信号 x と出力信号 y のクロススペクトルである。

入力信号がホワイトノイズのような信号で、全周波数帯域で SN 比が十分に高い理想的な条件では、 $\psi(f)$ を $1/G_{xx}(f)$ ($G_{xx}(f)$ は入力信号のパワースペクトル) とすれば、 $R_{GCC}(\tau)$ はインパルス応

時間窓長：1.37 s (65536ポイント、サンプリング周波数48kHz)
オーバーラップ：90%

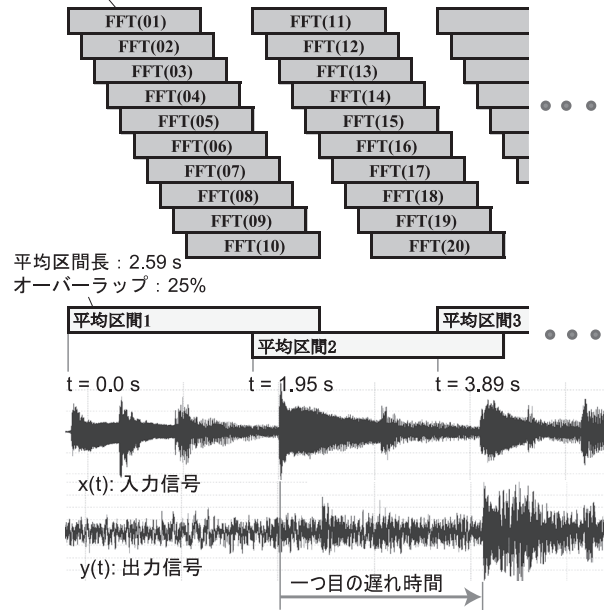


図-6 分析時間窓と平均区間のとり方

答と一致する。しかし、実際には入力信号に含まれない周波数成分や SN 比の低い周波数成分の影響で、インパルス応答の波形が乱れる。ここでは、 $\psi(f)$ を $1/\sqrt{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}$ ($G_{yy}(f)$ は出力信号のパワースペクトル) として、入力信号と出力信号の相関が高い (SN 比が高い) 周波数帯域を強く重み付けする方法⁷で算出した $R_{GCC}(\tau)$ の結果を紹介する。以下では、この方法による $R_{GCC}(\tau)$ を $R_{Scot}(\tau)$ と記述する。

多くの場合、 $R_{Scot}(\tau)$ はインパルス応答と完全には一致しない。しかし、定時放送のように含まれる周波数が限定される信号を入力信号としても、 $R_{Scot}(\tau)$ は SN 比が低い周波数成分の影響を受けにくいため、波形が乱れず音の遅れ時間の抽出が容易になる。また、SN 比がある一定の範囲内であれば、 $R_{Scot}(\tau)$ の振幅は SN 比と対応する。従って、暗騒音の物理特性が大きく変わらない場合は、 $R_{Scot}(\tau)$ の振幅を音が強く届いているかどうかの相対的な目安として考えることができる。

経験的に数 s 程度で生じると想定した音の揺らぎを分析するために、継続時間 60s のピアノ曲に対して、図-6 に示すような時間窓で入力信号と出力信号を切り出して、 $G_{xx}(f)$ 、 $G_{yy}(f)$ 、 $G_{xy}(f)$

⁷この場合、 $R_{GCC}(\tau)$ のパワースペクトルはコヒーレンス関数である。コヒーレンスは周波数成分ごとの入力信号と出力信号の相関の強さを示し、0 から 1 の値を取る。一般に測定点における SN 比が高くなるほど 1 に近づく。

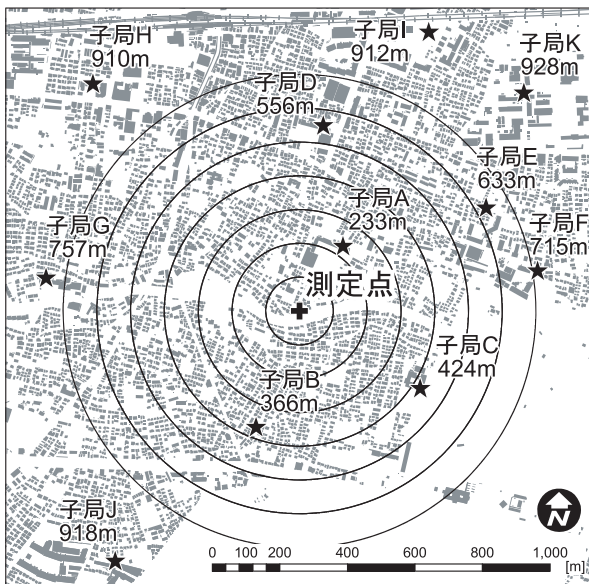


図-7 測定点と周囲の屋外拡声システムの子局の位置

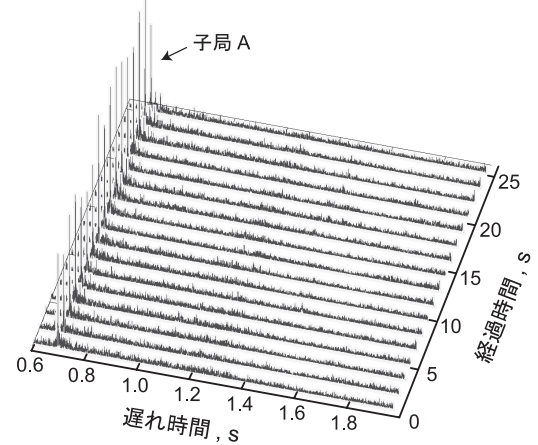
の平均処理をそれぞれ行うことにより、 $R_{\text{Scot}}(\tau)$ を約 2s ごとに求めた。なお、ある測定点において最も近い子局までの距離が例えば 340m 以上ある場合、少なくとも τ が 1s 以上であることを考慮して、出力信号を 1s 時間的に前にシフトして $R_{\text{Scot}}(\tau)$ を計算し、後から τ に 1s を加える操作を行っている。

定点測定は 4 点で行われたが、その中から図-7 に示す測定点における結果を紹介する。この測定点から 1km 程度の範囲に、屋外拡声システムの子局が 11 か所設置されている。

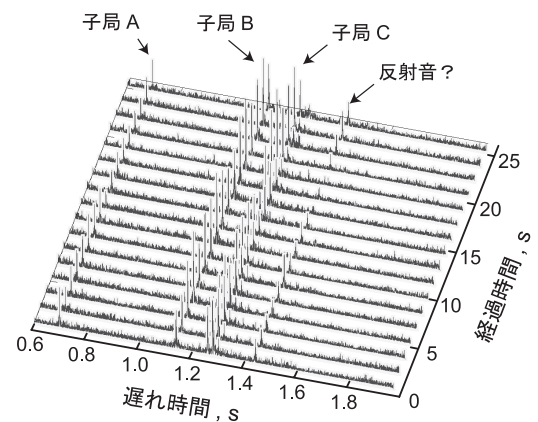
図-8 に $R_{\text{Scot}}(\tau)$ のパターンの代表例を三つ挙げる。(b) と (c) の例ではパルスが複数確認されたが、実際に録音データを聴いてみると複数の子局からの音がずれて聴こえており、 $R_{\text{Scot}}(\tau)$ のパターンと実際の状況が対応することが確認できた。屋外拡声システムからの音が聴き取りにくいとされる理由の一つとしてエコーが挙げられるが、この測定結果はその問題点を明確に示している。

図-8 にはそれぞれのパルスの遅れ時間から推定した音源と思われる子局を付記している。三つの図を比較すると、日によってパターンは大きく異なり、(a) では最も近い子局 A に対応するパルスのみが卓越するが、(b) と (c) では子局 A のパルスがかなり小さく、やや遠い子局 B 及び C からのパルスの方が大きい。3.2 節でも示したが、数百 m 程度離れた子局からの音は気象の影響を大きく受けることが分かる。

(a) 2013/09/07 17:00, 曇 27.0°C, 北東 1.6m/s



(b) 2013/09/10 17:00, 曇 26.1°C, 南東 1.9m/s



(c) 2013/09/12 17:00, 快晴 29.6°C, 南南西 3.0m/s

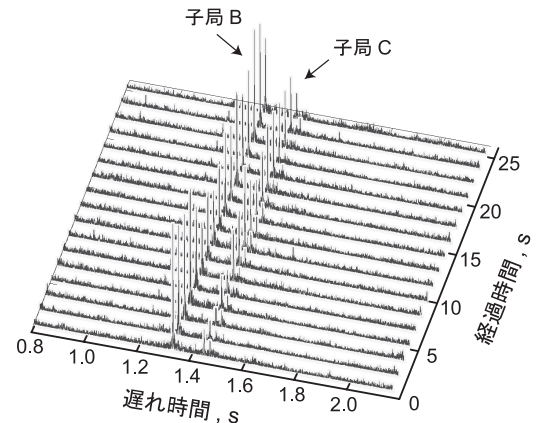


図-8 $R_{\text{Scot}}(\tau)$ の時間変化と気象条件による違い

4. おわりに

本稿では、屋外拡声システムの評価におけるインパルス応答について、影響を及ぼす要因をまとめると共に測定事例を紹介した。屋外では気象に代表される外乱要因が多いため正確なインパルス応答は測定できないが、エコーによって聴き取り

にくい、あるいは日によって聴こえ方が違うといった経験的に知られている問題点を見える形として示す程度であれば、定時放送を利用するといった制限が多い方法でも十分に可能である。

しかしながら、測定事例はわずかといいていい状態である。今後の屋外拡声システムのインパルス応答の測定とそのデータ蓄積による様々な技術の発展に本稿が役立てば幸いである。

謝 辞

Swept-Sine 法の測定事例の掲載をお許しいただいた東北大学電気通信研究所の鈴木陽一教授に感謝いたします。また、屋外拡声システムに関する研究について、日頃議論させていただいている日本音響学会災害等非常時屋外拡声システムのあり方に関する技術調査研究委員会（現：非常用屋外拡声システム調査研究委員会）の皆様にも感謝を申し上げます。

文 献

- [1] 翁長 博, “残響音場の音声了解度に対応する物理指標の提案,” 音響学会誌, **66**, 97–104 (2010).
- [2] 吉久光一, 岡田恭明, “騒音の長距離伝搬に及ぼす空気の音響吸収の影響,” 音響学会誌, **69**, 297–303 (2013).
- [3] 今泉博之, 高橋保盛, 井清武弘, “温度・風速勾配のある大気中の音響伝搬,” 音響学会誌, **62**, 50–55 (2006).
- [4] M. E. Delany, “Sound propagation in the atmosphere: A historical review,” *Acustica*, **38**, 201–223 (1977) (4. Fog and precipitation を参照のこと).
- [5] 栗栖清浩, 佐藤逸人, 森本政之, “降雨が屋外音響伝搬特性に及ぼす影響—大型降雨実験施設における測定—,” 音講論集, pp. 1577–1578 (2016.3).
- [6] T. Oshima, Y. Hiraguri and T. Okuzono, “Distinct effects of moisture and air contents on acoustic properties of sandy soil,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **138**, EL258 (2015).
- [7] 岩瀬昭雄, “積雪の音響特性と音響伝搬特性に及ぼす影響,” 雪工学会誌, **13**(3), pp. 33–40 (1997).
- [8] 牧 勝弘, 榊原健一, 山川仁子, 天野成昭, “降雪時および非降雪時における屋外拡声システムの音響伝搬特性,” 音講論集, pp. 1289–1290 (2016.9).
- [9] 飯田一博, 野村宗弘, 石井要次, 大島俊也, 内藤大介, “気象条件が防災放送の了解度に及ぼす影響—無響室での音場再生とバイノーラルシミュレーションの比較—,” 音講論集, pp. 1489–1492 (2015.3).
- [10] 佐藤史明, “Swept-Sine 法に基づく音響伝搬測定,” 音響学会誌, **63**, 322–327 (2007).
- [11] 金田 豊, “インパルス応答測定信号と測定誤差,” 音響学会誌, **69**, 549–554 (2013).
- [12] 藤本卓也, “低域バンドでの SN 比改善を目的とした TSP 信号に関する検討,” 音講論集, pp. 433–434 (1999.9).
- [13] 金田 豊, 飯山陽平, “BMN-SS インパルス応答測定法による残響時間測定の短時間化,” 音響学会建築音響研資, AA2019-55, pp. 1–8 (2019).
- [14] 森 淳一, 横山 栄, 佐藤史明, 橘 秀樹, “幾何音響シミュレーションと 6 チャンネル再生手法を用いた広域防災放送システム可聴化の試み,” 騒音制御, **38**, 123–131 (2014).
- [15] 金井 浩, 音響テクノロジーシリーズ 5 音・振動のスペクトル解析 (コロナ社, 東京, 1999).
- [16] 鈴木陽一, 崔 正烈, 齋藤文孝, 坂本修一, 森本政之, 宇佐川毅, 荻木禎史, 佐藤逸人, 岩谷幸雄, 青木雅彦, 小池宏寿, 高島和博, 鶴 秀生, 光枝太一, “屋外における災害情報の伝達性能の向上を目指して—総務省平成 23 年度 3 次補正予算による技術開発—,” 音講論集, pp. 1523–1526 (2013.3).
- [17] 高島和博, 青木雅彦, 鶴秀生, 光枝太一, 小池宏寿, 佐藤逸人, 齋藤文孝, 森本政之, 鈴木陽一, “屋外での音響伝達特性の測定とシミュレーションによる予測,” 音講論集, pp. 947–948 (2013.3).
- [18] 大島俊也, 岡田恭明, 平栗靖浩, 横田考俊, 牧野康一, 川瀬康彰, 今泉博之, “防災拡声放送の長期モニタリングとクロススペクトル法による気象影響の把握,” 音響学会騒音・振動研資, N-2014-25, pp. 1–11 (2014).