

## 防災行政無線屋外拡声子局における出力レベルの最適化\*

西村 竜一<sup>\*1</sup> 坂本 修一<sup>\*2</sup> 荻木 禎史<sup>\*3</sup> 山高 正烈<sup>\*4</sup>

【要旨】 防災行政無線では複数の屋外拡声子局が点在配置されるが、子局間の距離が遠いため、ある程度の遅れ時間のエコーを伴う音声の聴取が困難になるロングパスエコーと同様の問題が発生する。そこで、残響環境での音声了解度指標として提案された  $U_{50}$  に着目し、各屋外拡声器の音声レベルを適切に制御することで当該問題の軽減を試みた。本来、 $U_{50}$  は室内音響における初期到来音と後部残響音のエネルギー比で定義されるが、レベル制御下では初期到来音が音声聴取の主要要素になるとは限らない。そこで、確率的  $U_{50}$  を定義して、これを用いた全体最適化手法についても検討し、実際の屋外拡声子局配置に基づく計算機シミュレーションにより性能を評価した。

キーワード 非線形最適化,  $U_{50}$ , 確率的  $U_{50}$ , ロングパスエコー, 音声了解度指標

Nonlinear optimization,  $U_{50}$ , Probabilistic  $U_{50}$ , Long-path echo, Speech intelligibility scores

## 1. はじめに

防災行政無線は、緊急避難を広く住民に呼び掛ける上で重要な手段であるが、複数の子局に設置された屋外拡声器から同時に音声が発射されるため、それらが異なる時間遅れで受聴者に到達する。この現象は、ロングパスエコーと同様に音声の明瞭度を低下させて、伝えるべき情報が正しく伝わらない問題を引き起こす [1]。この問題の解決に向けて、全子局で同時に放送する“一斉放送”ではなく、子局を幾つかのグループに分けて順番に放送する“時差放送”も一部の自治体で導入されている。各グループは、放送した音声あまり干渉し合わない程度に離れた子局を組み合わせることで形成される。子局間の関係性に着目した改善の試みとしては、他にも、小野口らが、子局間で連携して各屋外拡声器からの放射タイミングを最適に制御し、隣接スピーカ間の放射音重複を低減する手法を提案している [2]。また、坂本らは、音声の単語の発話速度や単語間の無音区間の長さを調整することで、明瞭度の改善を試みた [3]。更に、劣悪聴取環境下でも頑健に音声伝達が可

能な高親密度単語で情報伝達を行う可能性についての検討も進められている [4]。これらは、元となる親局での音声信号を適切に加工することで、明瞭度の改善を試みたものである。時差放送であれ、一斉放送であれ、あらゆる地点で少しでも良い受聴環境を実現することが望ましい。そこで、想定される全受聴点を考慮した最適化手法について考えることにする。

同様なエコーが存在する残響下における音声聴取では、最初の音（以降、「初期到来音」と呼ぶ）の到来から一定時間までの到来音は、その音声の聴取に有益な信号エネルギーと考えられる。一方、それ以降に到来する音は、その音声内容を聞き取る上で妨げとなる信号エネルギーと考えられる。従って、それらのエネルギー比は音声の聞き取り易さに関係することが予想される。そこで、音声明瞭度の予測のための指標としてこのエネルギー比は定義され、*useful-to-detrimental sound ratio* と名付けられた [5]。初期到来音からどの程度の時間までが音声信号の聞き取りに有益な信号と考えられるかには自由度があるため、ミリ秒で表した時間を添字として付して表記される。例えば、初期到来音からの時間が 50 ms を境界として有益な音と障害となる音とを分けて求めた場合には  $U_{50}$  と表記される。特に  $U_{50}$  は、音声了解度指標 (SI : Speech Intelligibility scores) との間に、

$$SI = 1.027U_{50} - 0.0838U_{50}^2 + 99.42 \quad (1)$$

の関係性があると言われている [6]。また、その他の主観評価指標との関係性についても詳しい検討がなされている [7]。

ただし、各屋外拡声器の出力レベルを上げることで、

\* Optimization of output level of outdoor loudspeakers for municipal radio systems in times of disaster, by Ryouichi Nishimura, Shuichi Sakamoto, Yoshifumi Chisaki and Zhenglie Cui.

<sup>\*1</sup> 情報通信研究機構耐災害 ICT 研究センター

<sup>\*2</sup> 東北大学電気通信研究所

<sup>\*3</sup> 千葉工業大学

<sup>\*4</sup> 愛知工科大学

(問合先: 西村竜一 〒980-0812 仙台市青葉区片平 2-1-3 情報通信研究機構耐災害 ICT 研究センター e-mail: ryou@nict.go.jp)

(2019年11月12日受付, 2020年4月2日採録決定)

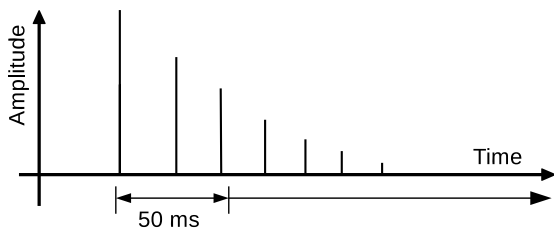


図-1 残響環境下におけるインパルス応答の例

$U_{50}$  が単純に上昇するわけでは必ずしもない。なぜなら、ある屋外拡声器の出力レベルの上昇は、一部の受聴地点に対しては  $U_{50}$  を上昇させることに寄与するが、別の受聴地点に対しては、初期到来音から 50 ms 以上遅れて到来した場合、 $U_{50}$  を減少させるためである。そこで本論文では、最適化アルゴリズムを利用して、このトレードオフが存在する下で、想定する受聴範囲全体において音声の明瞭性を確保しつつ、各防災行政無線の出力レベルを最適に決定する方法を確立することを試みる。

本論文は、次のように構成される。2 章では、 $U_{50}$  及び確率的  $U_{50}$  の定義について紹介する。3 章では、最適化手法として四つの手法の定式化を行う。4 章では、ある地域における実際の屋外拡声装置の配置を用いて、3 章で紹介した四つの手法の効果を比較する。最後に 5 章で、結論と今後の検討課題について述べる。

## 2. 音声了解度指標

### 2.1 残響環境下における $U_{50}$

残響環境下における音声明瞭度の指標として提案された  $U_{50}$  は、受聴点において観測される音声信号を  $y(t)$ 、雑音信号を  $z(t)$ 、初期到来音の到達時刻を  $t_0$ 、到来する音声信号の終了時刻を  $t_1$  として、

$$U_{50}(y, z) \equiv 10 \log_{10} \left[ \frac{\int_{t_0}^{t_0+0.05} |y(t)|^2 dt}{\int_{t_0+0.05}^{t_1} |y(t)|^2 dt + \int_{t_0}^{t_1} |z(t)|^2 dt} \right] \quad (2)$$

で定義される。つまり、音声信号のうち初期到来音から 50 ms 以内に到来する成分は音声聴取に有効な信号とみなし、それ以外を阻害する雑音とした場合のエネルギー比に基づく SN 比に対応する。なお、文献 [5] では  $t_1$  や  $\int z(t)^2 dt$  の積分範囲について必ずしも明記されていないため、本稿では式 (2) に基づいて考えることとする。

図-1 に残響環境下における簡略化したインパルス応答の概形の例を示す。初期到来音が最も大きなレベル

を有しており、遅くに到来する反射波ほど受聴地点におけるレベルは一般に小さくなる。音源信号を  $x(t)$ 、音源から受聴点までのインパルス応答を  $h(t)$  とすると、

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (3)$$

のように畳み込みで表されるので、周波数領域で考え、更に  $(\omega)$  の表記を省略すると

$$U_{50}(Y, Z) = 10 \log \left[ \frac{\int |H_{0 \leq t-t_0 \leq 0.05} X|^2 d\omega}{\int |H_{0.05 < t-t_0} X|^2 d\omega + \int |Z|^2 d\omega} \right] \quad (4)$$

で表すことができる。ここで、 $H_{0 \leq t-t_0 \leq 0.05}(\omega)$  はインパルス応答  $h(t)$  のうちの初期到来音から 50 ms までの部分信号の周波数表現であり、 $H_{0.05 < t-t_0}(\omega)$  も同様に定義される。また、 $X(\omega)$  は音源位置における音声信号の周波数表現である。

厳密には、音声信号の周波数表現は周波数の関数であるため、インパルス応答の周波数特性との振幅及び位相関係に応じて結果は変化する。音声信号としては様々な可能性が起こり得るため、音声信号のエネルギー  $|X(\omega)|^2$  を周波数非依存として、

$$E_x = |X(\omega)|^2 \quad (5)$$

で近似する。また、

$$E_z = \int |Z(\omega)|^2 d\omega \quad (6)$$

とすることにより式 (4) は

$$U_{50} = 10 \log \left[ \frac{E_x \int |H_{0 \leq t-t_0 \leq 0.05}(\omega)|^2 d\omega}{E_x \int |H_{0.05 < t-t_0}(\omega)|^2 d\omega + E_z} \right] = 10 \log \left[ \frac{E_x \int_{t_0}^{t_0+0.05} |h(t)|^2 dt}{E_x \int_{t_0+0.05}^{t_1} |h(t)|^2 dt + E_z} \right] \quad (7)$$

となる。

### 2.2 ロングパスエコー問題における $U_{50}$

防災行政無線の一斉放送では、すべての屋外拡声器で同じ音声再生されるため、式 (2) で定義される  $U_{50}$  は防災行政無線の屋外拡声器により生じるロングパスエコーに対する音声明瞭度の評価に適用することができる。このとき、屋外拡声子局  $m$  から受聴点  $n$  へのインパルス応答を  $h_{mn}(t)$  とすると、それらの和  $h_n(t)$  は、

$$h_n(t) = \sum_m h_{mn}(t) \quad (8)$$

で表現される。 $U_{50}$  は、式 (7) の  $h(t)$  を式 (8) に置き換えることにより求めることができる。

以降、議論を単純化するためにインパルス応答として

$$h_{mn}(t) = \delta(t - \tau_{mn})\Delta_m/d_{mn} \quad (9)$$

を考える。ここで  $\delta(\cdot)$  はディラックのデルタ関数、 $\Delta_m$  は屋外拡声子局  $m$  における屋外拡声器の地上からの距離であり、 $d_{mn}$  はその屋外拡声器から受聴地点  $n$  の地上までの距離である。更に、音速を  $c$  とすると  $\tau_{mn} = d_{mn}/c$  はその到来時間を表す。これは、屋外拡声器直下の地上における信号振幅を音源振幅とし、反射がなく距離減衰のみを考えることに相当する。なお、式 (9) は単純化であり近似化ではないため、反射波を含む状況にも拡張可能である。また、式 (9) とすることによりインパルス応答は時間的な広がりを持たないため、 $h_{mn}(t)$  に代えて  $h_{mn}$  と表記することとする。同様に、屋外拡声子局  $m$  の地上での信号振幅を  $x_m$ 、受聴点  $n$  での背景雑音エネルギーを  $z_n$  で表記する。これにより、ロングパスエコー問題における  $U_{50}$  は、

$$U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) \equiv 10 \log \left[ \frac{\sum_{m \in I_n^+} h_{mn}^2 x_m^2}{\sum_{m \in I_n^-} h_{mn}^2 x_m^2 + z_n} \right] \quad (10)$$

により定義される。ここで、屋外拡声子局の総数を  $M$ 、考慮する受聴地点の総数を  $N$  とすると

$$\mathbf{x} \equiv [x_1 \quad \dots \quad x_M], \quad \mathbf{z} \equiv [z_1 \quad \dots \quad z_N] \quad (11)$$

である。また、

$$I_n^+ = \{m \mid 0 \leq \tau_{mn} - \tau_{m_0 n} < 0.05\} \\ I_n^- = \{m \mid 0.05 \leq \tau_{mn} - \tau_{m_0 n}\} \quad (12)$$

であり、 $m_0$  は受聴点  $n$  において初期到来音を与える屋外拡声子局を表す。従って、 $m_0$  は受聴点に最も近い屋外拡声子局に対応する。

### 2.3 確率的 $U_{50}$

残響環境下においては、通常、図-1 に示すように個々の反射音よりも初期到来音のほうが大きな音となる。しかし、防災行政無線の屋外拡声器の聴取において各屋外拡声器の音声レベルに自由度を与えると、図-2 に示すように、必ずしも初期到来音が音声レベルとして

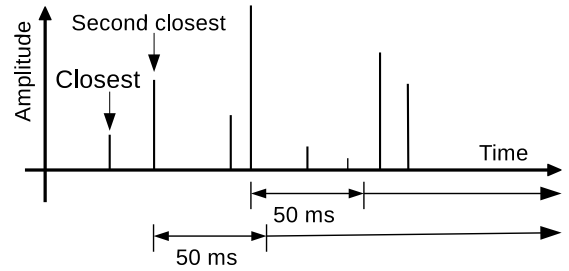


図-2 音声レベルが異なる複数の屋外拡声器が存在する場合のインパルス応答例（最近傍の子局から順番に届く）

主要な音になるとは限らない。例えば、受聴点から近い位置にある屋外拡声器での音声レベルが小さい場合、遠方の大きな音声レベルで出力する音のほうが、受聴点においてはより大きく聞こえる場合も考えられる。この場合は、一番最初に到来する音声よりも後から到来する音のほうが大きくなり、初期到来音のレベルが十分小さいときには、後から到来する大きな音が音声聴取には主要な役割を果たすことが予想される。

初期到来音以外の音を音声聴取における主要な音として扱うことを可能にするため、確率的  $U_{50}$  を次式で定義し  $\check{U}_{50}$  で表す [8]。

$$\check{U}_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) \equiv \sum_{m'} p(m' | \mathbf{x}, n) U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, m', n) \quad (13)$$

ここで、

$$p(m' | \mathbf{x}, n) = \frac{h_{m'n}^2 x_{m'}^2}{\sum_{m'} h_{m'n}^2 x_{m'}^2}, \quad (14)$$

$$U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, m', n) \equiv 10 \log \left[ \frac{\sum_{m \in I_{m'n}^+} h_{mn}^2 x_m^2}{\sum_{m \in I_{m'n}^-} h_{mn}^2 x_m^2 + z_n} \right], \quad (15)$$

$$I_{m'n}^+ = \{m \mid 0 \leq \tau_{mn} - \tau_{m'n} < 0.05\}$$

$$I_{m'n}^- = \{m \mid 0.05 \leq \tau_{mn} - \tau_{m'n}\} \quad (16)$$

である。 $U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, m', n)$  は、屋外拡声子局  $m'$  からの音を初期到来音とみなしたときの受聴地点  $n$  における  $U_{50}$  である。初期到来音とみなした音よりも先に到来した音は、式 (15) では無視されるが、式 (13) で加味されることになる。また、式 (14) は、各屋外拡声器からの到来音のエネルギー比に対応する。従って、式 (13) は、各屋外拡声器からの音を初期到来音とみなしたときに計算される  $U_{50}$  に対し、そのエネルギー比によ

て与えられる重みを掛けて平均化した値と解釈することができる。このように式 (13) は、初期到来音を発している屋外拡声器を到達時間差のみで決定論的に決めるのではなく、観測地点における各屋外拡声器からの到達音でのエネルギー割合に基づいて決めることに対応する。観測地点から距離が近い屋外拡声器のほうが距離減衰が少なくなるため、初期到来音として選択される可能性が高くなるが、各屋外拡声器での出力信号レベルが同一でない場合には、必ずしもそうなるとは限らない。

なお、2.2 節における  $U_{50}$  の定義式 (10) は、確率的  $U_{50}$  の定義式 (13) において、

$$p(m'|\mathbf{x}, n) = \begin{cases} 1 & m' = m_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

を用いた場合に対応する。

### 3. 最適化アルゴリズム

#### 3.1 最適化手法

ここでは、四つの方法での最適化手法の定式化を行い、各手法の詳細については以降の節で説明することとする。一つ目は、 $U_{50}$  の平均値の最大化である。式で表現すると、

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} \left[ \sum_n U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) - \beta |\mathbf{x}|^\alpha \right] \quad (18)$$

となる。右辺第 2 項は、屋外拡声装置での音声レベルが大きくなり過ぎないようにするための正規化項であり、 $\alpha$  及び  $\beta$  はパラメータである。以下、この手法を「 $U_{50}$  の平均値の最大化」(手法 1) と呼ぶ。

二つ目は、式 (13) で定義した確率的  $U_{50}$  の平均値の最大化である。式で表現すると、

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} \left[ \sum_n \check{U}_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) - \beta |\mathbf{x}|^\alpha \right] \quad (19)$$

となる [8]。以下、この手法を「確率的  $U_{50}$  の平均値の最大化」(手法 2) と呼ぶ。

三つ目は、観測地点における  $U_{50}$  の最小値に不等式制約を与えた上での、屋外拡声器からの出力エネルギーの最小化である。式で表現すると、

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} [|\mathbf{x}|^\alpha]$$

subject to

$$U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) \geq T_1 \quad n = 1, \dots, N \quad (20)$$

となる [9]。ここで、 $T_1$  は  $U_{50}$  の下限を定めるパラメータを表す。以下、この手法を「 $U_{50}$  の最小値に制約条件を持つ出力エネルギー最小化」(手法 3) と呼ぶ。

四つ目は、観測地点における  $U_{50}$  の最小値を最大化した後に、不等式制約を与えた  $U_{50}$  の平均値の最大化である。式で表現すると、不等式条件付の最適化問題として、

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} \left[ \sum_n U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) - \beta |\mathbf{x}|^\alpha \right]$$

subject to

$$U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) \geq \max [\min [U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n)]] \quad (21)$$

で表現される。制約条件の右辺は、最初に  $U_{50}$  の最小値の最大化を行うことを意味している。以下、この手法を「 $U_{50}$  の最小値に制約条件を持つ  $U_{50}$  の平均値の最大化」(手法 4) と呼ぶ。

#### 3.2 確率的 $U_{50}$ の平均値の最大化

前述のとおり、 $U_{50}$  は  $\check{U}_{50}$  の特殊な形とみなせるため、確率的  $U_{50}$  の平均値の最大化の手法について述べる。文献 [8] では EM アルゴリズムを利用した解法が用いられたが、ここでは最急降下法を用いることを考える。

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \equiv \sum_n \check{U}_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) - \beta |\mathbf{x}|^\alpha \quad (22)$$

とし、エネルギーとの親和性から  $L^2$  ノルムを考え  $\alpha = 2$  を仮定すると、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} L(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \\ &= \sum_n \sum_{m'} \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} p(m'|\mathbf{x}, n) U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, m', n) \right. \\ & \quad \left. + p(m'|\mathbf{x}, n) \frac{\partial}{\partial x_i} U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, m', n) \right] - 2\beta x_i \end{aligned} \quad (23)$$

となる。ここで、

$$\frac{\partial}{\partial x_i} U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, m', n) = \begin{cases} \frac{10}{\ln 10} \frac{2h_{in}^2 x_i}{\sum_{m \in I_{m'n}^+} h_{mn}^2 x_m^2} & i \in I_{m'n}^+ \\ -\frac{10}{\ln 10} \frac{2h_{in}^2 x_i}{\sum_{m \in I_{m'n}^-} h_{mn}^2 x_m^2 + z_n} & i \in I_{m'n}^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

であり、

$$\frac{\partial}{\partial x_i} p(m' | \mathbf{x}, \mathbf{z}) = \begin{cases} \frac{2h_{in}^2 x_i}{\sum_m h_{mn}^2 x_m^2} - \frac{2h_{in}^2 h_{m'n}^2 x_i x_{m'}}{(\sum_m h_{mn}^2 x_m^2)^2} & i = m' \\ -\frac{2h_{in}^2 h_{m'n}^2 x_i x_{m'}}{(\sum_m h_{mn}^2 x_m^2)^2} & i \neq m' \end{cases} \quad (25)$$

である。これを用いて、 $k$  回目の  $\mathbf{x}$  の更新は、

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \mu \nabla_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{z}) \quad (26)$$

により行われる。後述の計算機シミュレーションでは、幾つかの値を用いて実施した予備シミュレーションを基に収束速度と安定性を考慮し、 $\mu = 0.2$  とした。一定の終了条件を満たすまで、式 (23) から式 (26) の計算を繰り返すことになる。

### 3.3 $U_{50}$ の最小値に制約条件を持つ出力エネルギー最小化

主双対内点法により式 (20) を解くことを考える [9]。スラック変数  $\mathbf{s}$  を導入すると、式 (20) の不等式制約は、

$$g_n(\mathbf{x}) = T_1 - U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) + s_n = 0 \quad (27)$$

$$s_n \geq 0 \quad n = 1, \dots, N \quad (28)$$

で書き直すことができるため、改めて  $\mathbf{x}$  を

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^T & \mathbf{s}^T \end{bmatrix}^T \quad (29)$$

で定義し直し、更に不等式条件  $x_i > 0$  を満たすために対数障壁関数を導入すると、

$$\min \left[ f(\mathbf{x}) - \nu \sum_{i=1}^Q \log x_i \right]$$

subject to

$$g_n(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 0 \quad n = 1, \dots, N$$

$$x_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, Q \quad (30)$$

として式 (20) を書き直すことができる。ここで、 $Q = M + N$  であり、

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^M x_i^2 \quad (31)$$

である。更に  $\nu$  はパラメータであり、繰り返しが進むにつれてその値を 0 に漸近させる。このとき、ラグランジアンは、

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{z}) = f(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{x} + \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \quad (32)$$

で与えられる。主双対内点法では、 $k$  をカウンタ変数

として、

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \nabla_{\mathbf{x}\mathbf{x}} L(\mathbf{x}_k, \boldsymbol{\lambda}_k, \boldsymbol{\mu}_k, \mathbf{z}) & J\mathbf{g}(\mathbf{x}_k, \mathbf{z})^T & -\mathbf{I} \\ J\mathbf{g}(\mathbf{x}_k, \mathbf{z}) & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\Lambda}_k & \mathbf{0} & \mathbf{X}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \boldsymbol{\mu} \\ \Delta \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} \\ & = - \begin{bmatrix} \nabla_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}_k, \boldsymbol{\lambda}_k, \boldsymbol{\mu}_k, \mathbf{z}) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}_k, \mathbf{z}) \\ \mathbf{X}_k \boldsymbol{\lambda}_k - \nu \mathbf{1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (33)$$

により、不等式条件 (30) を満たしながら再帰的に各変数を探索する。ここで  $\nabla_{\mathbf{x}\mathbf{x}}$  はヘッセ行列、 $J$  はヤコビ行列、 $\boldsymbol{\Lambda}_k$  及び  $\mathbf{X}_k$  は  $\lambda_i$  及び  $x_i$  を、それぞれ対角要素とする対角行列である [10]。

ヤコビ行列を求めるにあたって、 $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  の 1 階の偏微分を求める必要があるが、次のように計算される。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{z}) = 2x_i - \lambda_i + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \quad (34)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$$

$$= \begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x_i} U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) & i = 1, \dots, M \\ 1 & i = M + 1, \dots, Q \end{cases} \quad (35)$$

ヘッセ行列を求める際の 2 階の偏微分についても、条件分けすることで、次のようにして求めることができる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{z}) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ 2x_i - \lambda_i + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \right\} \\ & = \begin{cases} 2 + \mu \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) & i = j \\ \mu \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) & i \neq j \end{cases} \end{aligned} \quad (36)$$

ここで、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \\ & = \begin{cases} -\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) & i = 1, \dots, M \\ 0 & i = M + 1, \dots, Q \end{cases} \end{aligned} \quad (37)$$

及び

$$\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, m', n) = \begin{cases} -\frac{10}{\ln 10} \frac{4h_{in}^2 h_{jn}^2 x_i x_j}{\left(\sum_{m \in I_{m'n}^+} h_{mn}^2 x_m^2\right)^2} & i \neq j, i, j \in I_{m'n}^+ \\ -\frac{10}{\ln 10} \left[ \frac{4h_{in}^2 h_{jn}^2 x_i x_j}{\left(\sum_{m \in I_{m'n}^+} h_{mn}^2 x_m^2\right)^2} - \frac{2h_{in}^2}{\sum_{m \in I_{m'n}^+} h_{mn}^2 x_m^2} \right] & i = j, i, j \in I_{m'n}^+ \\ \frac{10}{\ln 10} \frac{4h_{in}^2 h_{jn}^2 x_i x_j}{\left(\sum_{m \in I_{m'n}^-} h_{mn}^2 x_m^2 + z_n\right)^2} & i \neq j, i, j \in I_{m'n}^- \\ \frac{10}{\ln 10} \left[ \frac{4h_{in}^2 h_{jn}^2 x_i x_j}{\left(\sum_{m \in I_{m'n}^-} h_{mn}^2 x_m^2 + z_n\right)^2} - \frac{2h_{in}^2}{\sum_{m \in I_{m'n}^-} h_{mn}^2 x_m^2 + z_n} \right] & i = j, i, j \in I_{m'n}^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (38)$$

である。

### 3.4 $U_{50}$ の最小値に制約条件を持つ $U_{50}$ の平均値の最大化

#### 3.4.1 $U_{50}$ の最小値の最大化

次のステップにより  $U_{50}$  の最小値の最大化を図る。

ステップ 1:

集合  $R$  を

$$R = \{n \mid U_{50}(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{z}, n) - U_{\min}^{(k)} < T_2\},$$

$$U_{\min}^{(k)} \equiv \min_n [U_{50}(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{z}, n)] \quad (39)$$

で定義する。ここで  $T_2$  は、 $U_{50}$  の最小値とどの程度近い  $U_{50}$  を持つ受聴点を考慮するかを決めるパラメータである。

ステップ 2:

その屋外拡声器の出力レベルを上げることにより、受聴点  $n \in R$  における  $U_{50}$  が増加する屋外拡声子局の集合  $V^+$  を

$$V^+ = \bigcup_{n \in R} \left\{ m \mid \frac{\partial}{\partial x_m} U_{50}(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{z}, n) > 0 \right\} \quad (40)$$

で定める。その逆も同様にして、

$$V^- = \bigcup_{n \in R} \left\{ m \mid \frac{\partial}{\partial x_m} U_{50}(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{z}, n) < 0 \right\} \quad (41)$$

$$W = V^- - V^- \cap V^+ \quad (42)$$

で定める。すると、 $W$  は  $U_{50}$  が低下することにはしか寄与しない屋外拡声子局の集合となる。

ステップ 3:

次式により、 $\mathbf{x}$  を更新する。

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \gamma^+ - \gamma^- \quad (43)$$

ここで、 $\gamma^+$  は要素番号  $m \in V^+$  が  $\gamma^+$  で他が 0 の要素数  $M$  のベクトルを表す。同様に、 $\gamma^-$  は要素番号  $m \in W$  が  $\gamma^-$  で他が 0 である。収束速度と安定性の観点から、変化分は元の変数に比してある程度小さい値が適当であることから、次節の計算機シミュレーションでは予備シミュレーションの結果を基に  $\gamma^+ = 0.01 \max[\mathbf{x}^{(k)}]$ ,  $\gamma^- = 0.1\gamma^+$  とした。

ステップ 4:

更新された  $\mathbf{x}$  を用いて  $U_{50}$  を再計算し、

$$\min_n [U_{50}(\mathbf{x}^{(k+1)}, \mathbf{z}, n)] > \min_n [U_{50}(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{z}, n)] \quad (44)$$

を満たせばステップ 3 に戻り、そうでなければステップ 1 に戻る。

以上の処理を、終了条件が満たされるまで繰り返す。ステップ 3 における式 (43) の更新式は、 $U_{50}$  の最小値を必ず上昇させる保証はない。なぜなら、ある聴取点における  $U_{50}$  を上げるために、その近傍の屋外拡声器の出力レベルを上げることは、他の聴取点における  $U_{50}$  を下げるからである。もし、最も  $U_{50}$  の低い地点のみに着目して更新を行うと、 $U_{50}$  が最も低い地点と 2 番目に低い地点の値が同一になった時点で膠着状態が発生する。ステップ 1 における式 (39) は、この問題を回避するためのものである。

#### 3.4.2 不等式条件を含む $U_{50}$ の平均値の最大化

次に、 $U_{50}$  の平均値の最大化を行う。手法は、3.3 節で解説した主双対内点法を用いる。ただし、式 (31) に代えて、

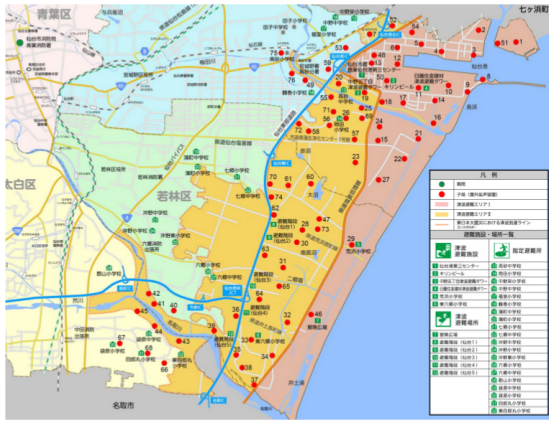


図-3 仙台市の防災行政無線の屋外拡声器の分布（仙台市「仙台市津波情報伝達システム」から（2014年度時点））

$$f(\mathbf{x}) = - \sum_n U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) + \beta |\mathbf{x}|^\alpha \quad (45)$$

を使用する。この場合、ヤコビ行列中のラグランジアンを求める際に、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{z}) \\ &= - \sum_n \frac{\partial}{\partial x_i} U_{50}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, n) + 2x_i - \lambda_i \\ & \quad + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} g(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \end{aligned} \quad (46)$$

を計算しなければならない。式 (34) の右辺に  $-\sum \frac{\partial}{\partial x_i} U_{50}$  が追加になるため式 (24) を用いることになる。ヘッセ行列を導出する際の2階の偏微分については式 (38) を利用する。主双対内点法では、不等式条件を満たす解空間の中で最適解を探すことになるため、屋外拡声器の出力レベル  $\mathbf{x}$  の初期値としては、3.4.1 項で求めた  $U_{50}$  の最小値を最大化した結果を用いる。

#### 4. 計算機シミュレーション

ここでは、実際の配置を想定した計算機シミュレーションにより、提案する各手法の実効性を確認する。実問題への適用に際して起こり得る問題点や達成レベルを明らかにし、それぞれの手法の特長について比較検討する。

##### 4.1 シミュレーションの方法

仙台市は、防災行政無線の屋外拡声器の設置場所に関する情報を公開している [11]。公開されているのは地図データであり座標データに変換する必要があるため、Google マップを利用して図-3の赤丸で示されている屋外拡声器の配置箇所の東経北緯の情報を取得し、座標値に変換した。また、仮想受聴点を 500 m 間隔の格子状に配置し、直近の屋外拡声子局からの音の到来時間が 5.5 秒 (48 kHz サンプリングで  $2^{18}$  ポイント)

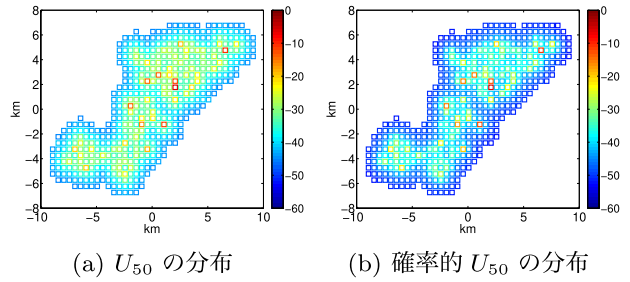


図-4 全屋外拡声子局の再生振幅が1の初期状態における  $U_{50}$  [dB] 及び確率的  $U_{50}$  [dB] の分布

以上離れた地点を対象から除外することで、想定する聴取地点は 539 地点となる。これにより、隙間のない一つの広域サービスエリアが仮定されることになる。更に、屋外拡声器は地上 10 m の位置にある無指向性の点音源と仮定し、各受聴点における到来音のレベルは単純な距離減衰のみを考慮して計算した。また、環境雑音のレベルは、想定するすべての聴取地点において等しく  $z_n = 1$  とした。従って、導出される屋外拡声器の出力振幅は、この環境雑音に対する相対値である。

初期値については、次のように設定した。手法 1 及び手法 2 では、すべての屋外拡声器で一様に  $x_m = 1$  とした。手法 3 では、出力レベルを一様に上昇させた場合のシミュレーション結果に基づいて  $x_m = 400$  とし、そのときの  $U_{50}$  の値を参考に、不等式制約条件の下限は達成可能な  $T_1 = -12$  とした。手法 4 では、3.4.1 項で述べた  $U_{50}$  の最小値の最大化の処理の結果として得られる振幅分布と最小値を使用した。いずれの手法においても、スラック変数の初期値は、0 から屋外拡声器の最大値の範囲の一様乱数で生成した。

また、終了条件は次のとおりである。手法 1 及び手法 2 では、式 (26) の  $\mu$  を用いて更新による  $U_{50}$  の改善量が  $1\mu$  dB 未満か、指定した更新回数に達した場合とした。手法 3 及び手法 4 では、更新による最小 (大) 化の改善に 3 回続けて失敗した場合とした。なお、手法 3 及び手法 4 では、スラック変数を乱数で与えているため、100 回の試行を行い、最も良い結果が得られたものを採用した。その他のパラメータは、 $\beta = 0.001$ ,  $T_2 = 1$  とした。

比較のための基準として、手法 1 及び手法 2 で初期状態にあたる、すべての屋外拡声器で出力レベルが一定の  $x_m = 1$  で音声を再生した場合の  $U_{50}$  及び確率的  $U_{50}$  の分布を図-4 に示す。全体的に周辺部における値が小さく、また、屋外拡声子局が多い地域で必ずしも値が大きいわけではないことが分かる。

##### 4.2 シミュレーションの結果

###### 4.2.1 $U_{50}$ 及び確率的 $U_{50}$

各最適化手法を適用した際の  $U_{50}$  の分布を図-5 に

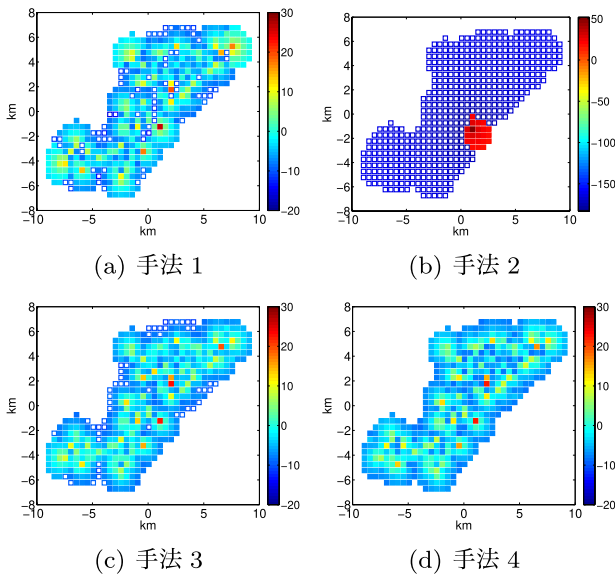


図-5 各最適化手法を適用したときの  $U_{50}$  [dB] の分布

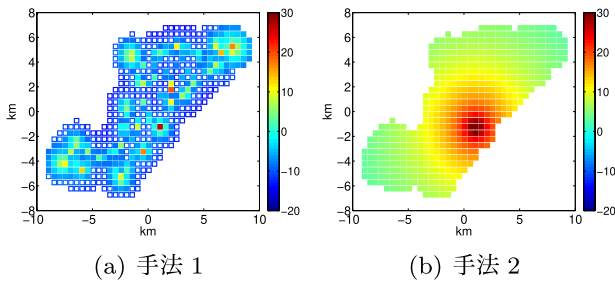


図-6 手法 1 及び手法 2 による確率的  $U_{50}$  [dB] の分布

示す。図-5(b) の手法 2 の場合のみ、値域が異なる点に注意が必要である。また、各手法の違いを分かり易くするために、 $U_{50}$  が  $-9$  dB 以上の地点は塗り潰して表示している。図-4 の結果と比較して、特に周辺部を中心に値が小さい受聴点が減少している傾向が伺える。また、手法 2 では、一つの屋外拡声子局のみで放送する自明解に収束する。この場合は、妨害する音声がないため、確率的  $U_{50}$  の観点からは最適となる。一方、 $U_{50}$  では最も近傍の屋外拡声子局からの到来時間を初期到来音の時間として計算しているため、唯一放送している屋外拡声子局以外の屋外拡声子局を最近とする受聴地点においては、妨害音しか存在しなくなり  $U_{50}$  の値は  $-\infty$  となる。実際、このときの手法 1 及び手法 2 による確率的  $U_{50}$  の分布を図-6 に示す。図-5 の結果と異なり、手法 2 では全受聴地点において高い値が実現されており、確率的  $U_{50}$  での全体最適化が達成できていることが確認できる。

$U_{50}$  の結果を昇順の分布で表示したものが図-7(a) であり、箱ひげ図で表示したものが図-7(b) である。図-7(a) では、十分な音声了解度が得られるとされる  $U_{50} = 6$  dB、及び、図-5 で塗り潰すか中抜きにする

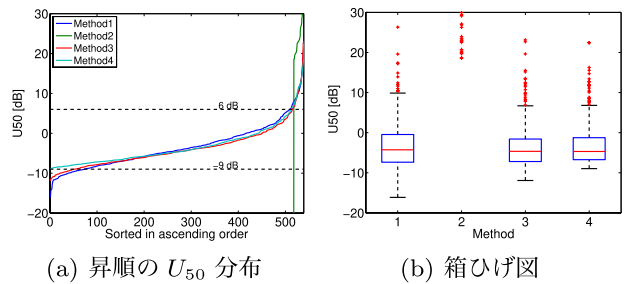


図-7  $U_{50}$  [dB] を昇順にソートした結果と箱ひげ図

表-1  $U_{50}$  の平均値と最小値 [dB]

手法	1	2	3	4
平均値	-3.5	$-\infty$	-3.8	-3.3
最小値	-16.1	$-\infty$	-11.9	-9.0

かの境界とした  $U_{50} = -9$  dB を破線で示す。図-7(b) の箱中の線は中央値、箱の上端と下端はそれぞれ四分位数を表す。外れ値は、四分位数の上端及び下端から四分位範囲の 1.5 倍を超えて外れているデータを指し '+' で示されている。また、ひげの長さは、外れ値にならない範囲に存在するデータの最大値及び最小値により与えられる。従って、図-7(b) では箱の下側に外れ値がないため、ひげの下端が最小値に対応する。図-5 の結果から分かるように、手法 2 の値域は他の手法と大きく異なるため、図-7 では縦軸の表示範囲を  $-20$  dB から  $30$  dB の範囲に制限した。四分位数で手法間に大きな差は見られず、広域で  $U_{50}$  にして  $6$  dB 以上を達成するのが、どの手法においても難しいことが確認された。

また、 $U_{50}$  の具体的な平均値及び最小値を表-1 に記す。最小値については、最適化アルゴリズムから予想されるとおり、手法 2 を除いては手法 1 が最も低く、手法 4 が最も高い結果が得られている。最も条件が悪い地点に着目するのであれば、提案手法の中では、やはり手法 4 が最適であると言える。一方、平均値の最大値は、手法 1 ではなく手法 4 のときに得られた。最大化の評価関数は式 (18) と式 (45) とで本質的に同一だが、初期値が異なるために、別の局所最適解に収束したことが要因の一つと考えられる。逆にこれは、手法 4 で着目した  $U_{50}$  の最小値を最大化するという条件が、手法 1 で着目した  $U_{50}$  の平均値の最大化という条件にあまり影響を与えずに導入できることを示唆しているとも言える。

#### 4.2.2 屋外拡声器の出力

各最適化手法を適用したときの屋外拡声器の出力振幅分布を図-8 に示す。全体的に周辺部に位置する屋外拡声器で出力レベルが高い傾向にあることが見てとれる。また、昇順に並べた分布及び箱ひげ図を図-9 に示



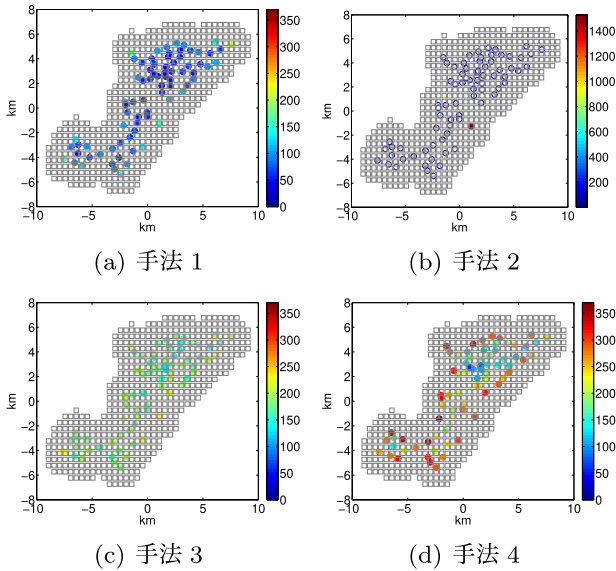


図-8 各最適化手法を適用したときの屋外拡声器の出力振幅分布

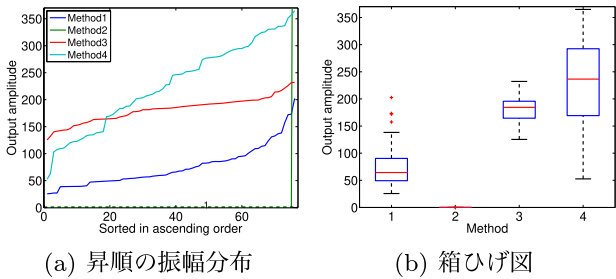


図-9 各手法における出力振幅

す。図-8の結果から分かるように、手法2の値域は他の手法と大きく異なるため、図-9では縦軸の表示範囲の上限を360に制限した。全体的な傾向として、屋外拡声子局群の中央付近に位置するものは出力振幅が低下しており、特に手法4においてその傾向が顕著であることが分かる。手法1の出力振幅が相対的に小さいが、前節同様、初期値の違いが要因と考えられる。また、出力振幅の値域に大きな開きがあるにも関わらず、 $U_{50}$ の分布に大きな差が現れないのは興味深い。SN比的な観点ばかりでなく、最適な聴取レベルという点も考慮した設計が、今後求められる。

### 4.3 考察

#### 4.3.1 確率的 $U_{50}$ について

手法2では、繰り返し計算により、ほとんど放送を出力しない屋外拡声子局が生まれる。そこで、屋外拡声子局自体の数を減らせるかどうかを検討するため、出力レベルが著しく低下した子局の数の増加と達成される確率的  $U_{50}$  の平均値の関係を示したものが図-10である。また、そのときの出力振幅の最大値も同じ図に合わせて示す。最初の数個については、確率的  $U_{50}$  に不連続な上昇が見られるが、それ以降は滑らかに増

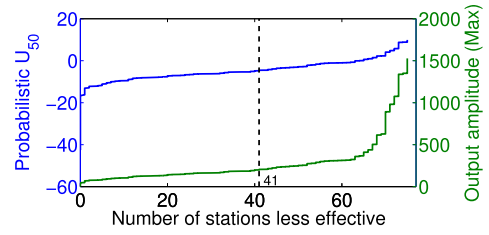


図-10 出力振幅が1以下となる子局数と確率的  $U_{50}$  [dB] の平均値及び出力振幅の最大値の関係

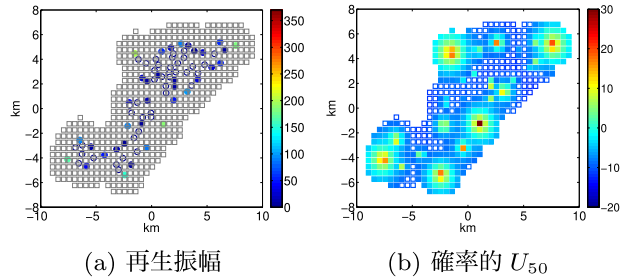


図-11 再生振幅の最大値がおおよそ200のときの再生振幅及び確率的  $U_{50}$  [dB] の分布

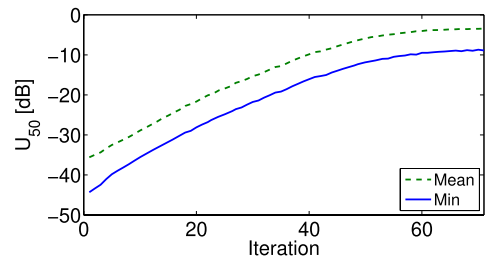


図-12 学習曲線

加している。一方、ある程度まで屋外拡声子局の数を減らしてからは、出力振幅を上げることにより、確率的  $U_{50}$  の上昇を実現していることが伺える。従って、確率的  $U_{50}$  を指標とするなら、最初の数個に該当する屋外拡声子局はなくても影響がないと考えられる。

また、図-10の結果を基に、手法1の最適解における出力振幅の最大値と同じ200の時点における、再生振幅、及び、そのときの確率的  $U_{50}$  の空間分布を図示したのが、図-11の(a)及び(b)である。手法1に対する結果である図-8(a)及び図-6(a)と比較すると、高い確率的  $U_{50}$  を持つ領域が、少ない屋外拡声子局数で実現できていることが分かる。従って、出力レベルに一定の上限がある場合でも、手法2の更新アルゴリズムを適用して途中で繰り返しを止めることで、確率的  $U_{50}$  に基づく全体最適化という観点で、より良い結果が得られることが期待される。

#### 4.3.2 最小値の最大化に関する学習特性について

3.4.1項において述べた手法4における  $U_{50}$  の最小値の最大化について、繰り返しごとの最小値の上昇を図示したものが図-12である。繰り返し処理の終了条

件を満たす頃には、概ね飽和状態に達していることが確認できる。従って、用いた更新パラメータにも依存すると考えられるが、最小値の最大化と  $U_{50}$  の平均値の最大化は、同時に達成することができると考えられる。

## 5. 結 論

残響環境下における音声了解度と関係性のある指標として知られている  $U_{50}$  を元に、ロングパスエコー問題にも適用できるように確率的な要素を取り入れた確率的  $U_{50}$  を提案すると共に、複数の最適化アルゴリズムにより防災行政無線屋外拡声器の出力レベルを適切に調整する手法について検討した。その結果、最小値を最大化するアルゴリズムが、平均値の最適化も同時に達成することができ、有望な手法であることが示唆された。一方、確率的  $U_{50}$  に基づくアルゴリズムについても、最適化が達成できることが確認されたが、確率的  $U_{50}$  と音声の了解性との関係性解明が、今後の課題として残されている。

今回の検討では、出力レベルが大きくなり過ぎるのを抑制するために正規化項を入れたが、実際的なシステムを考えた場合、屋外拡声器での出力レベルには上限がある。従って、最適化問題の定式化においては、出力振幅の最大値を不等式による拘束条件として取り込むことにより、更に現実的な手法になると考えられる。また、最適化アルゴリズムには様々なパラメータも含まれており、それらの値や初期値にも少なからず影響することが確認された。それらについても、今後、更なる検討が必要である。本報告が、屋外拡声子局の配置や出力振幅を決める上での一助となることを期待する。

## 謝 辞

本研究は、日本學術振興財団科研費基盤 B (特設分野研究) (16KT0100) の補助を受けた。

## 文 献

- [1] S. Sakamoto, Z. Cui, T. Miyashita, M. Morimoto, Y. Suzuki and H. Sato, "Effects of inter-word pauses on speech intelligibility under long-path echo conditions," *Appl. Acoust.*, 140, 263–274 (2018).
- [2] 小野口平, 村上 弾, 菅木禎史, "インテリジェント拡声システムにおけるタイミング制御に与える誤差要因の検討," 信学技報, 114(178), pp. 1–6 (2014).
- [3] 坂本 充, 小野口平, 菅木禎史, "ピッチ及びパワーに着目した屋外拡声アナウンスへの自動ポーズ挿入手法," 信学技報, 115(302), pp. 7–11 (2015).
- [4] Z. Cui, S. Sakamoto, M. Morimoto, Y. Suzuki and H. Sato, "Effect of word familiarity on word intelligibility of four continuous words under long-path echo conditions," *Appl. Acoust.*, 124, 30–37 (2017).
- [5] J. S. Bradley, "Speech intelligibility studies in classrooms," *J. Acoust. Soc. Am.*, 80, 846–854 (1986).

- [6] J. S. Bradley and S. R. Bistafa, "Relating speech intelligibility to useful-to-detrimental sound ratios (L)," *J. Acoust. Soc. Am.*, 112, 27–29 (2002).
- [7] H. Sato, J. S. Bradley and M. Morimoto, "Using listening difficulty ratings of conditions for speech communication in rooms," *J. Acoust. Soc. Am.*, 117, 1157–1167 (2005).
- [8] 西村竜一, 坂本修一, 菅木禎史, 崔 正烈, "防災行政無線屋外拡声レベルの  $U_{50}$  に基づく最適設計," 信学技報, 117(515), pp. 245–250 (2018).
- [9] 西村竜一, 坂本修一, 菅木禎史, 崔 正烈, "防災行政無線屋外拡声子局の最適再生レベルに関する検討," 音講論集, pp. 195–196 (2018.9).
- [10] 寒野善博, 土谷 隆, 最適化と変分法 (丸善出版, 東京, 2014), pp. 83–86.
- [11] <https://www.city.sendai.jp/joho-kikaku/shise/security/kokai/opendata-tsunamijohodentatsu.html> (参照 2020-03-16).



西村 竜一

1998 年東北大学大学院情報科学研究科博士課程修了。同年, ATR 知能映像通信研究所入所。2000 年東北大学電気通信研究所助手となり, 助教授を経て, 2006 年から情報通信研究機構で音響信号処理の研究に従事。現在, 耐災害 ICT 研究センター主任研究員。IEEE, 電子情報通信学会, 日本音響学会各会員。博士 (情報科学)。



坂本 修一

1997 年東北大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年 (株) 日立製作所入社。2000 年から東北大学電気通信研究所。現在, 同所教授。博士 (工学)。単語知覚過程, 音空間知覚, 聴覚・多感覚情報処理過程に関する研究に従事。日本音響学会, 米国音響学会, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会等の学会各

会員。



菅木 禎史

1996 年熊本大学大学院自然科学研究科博士課程単位修得退学。熊本大学助手・助教・准教授を経て, 2016 年千葉工業大学教授。博士 (工学)。電気音響・教育工学分野を中心とした研究に従事。日本音響学会, 米国音響学会, 電子情報通信学会, 日本教育工学会ほかの会員。日本音響学会理事・編集委員会委員長。



山高 正烈

2004 年九州大学大学院システム情報科学府博士課程修了。同年, 同大学 COE 研究員・ユーザーサイエンス機構研究員を経て, 2009 年より東北大学電気通信研究所研究員, 助教。2019 年より愛知工科大学准教授, 現在に至る。人工現実感環境生成法, 人の感性・生理・心理特性に関する研究, ドライビングシミュレータを用いた運転行動ヒューマンインタフェースの研究等に従事。博士 (工学)。