

音響エコーキャンセラの室内環境 における消去特性について

On the Performance of Acoustic Echo Canceller
under Acoustical Room Environment.

牧野 昭二 小泉 宣夫

Shoji MAKINO Nobuo KOIZUMI

(NTT 電気通信研究所)

NTT Electrical Communications Labs.

1. まえがき

通信会議では、自然な拡声通話を実現することが重要である。

近年、通信会議用拡声装置におけるハウリングやエコーの防止手段として、音響エコーキャンセラがさかんに検討されている。音響エコーキャンセラは、スピーカ、マイクロホン、音場からなる音響信号の伝達経路（音響エコー経路）のインパルス応答を模擬するデジタルフィルタの出力を、真の音響信号の伝達経路の出力から差引きこれを消去するもので¹⁾音響エコー経路の同定精度がエコー消去量を左右する。音響エコーキャンセラの構成の一つとして適応形 FIR (Finite Impulse Response) フィルタを使用し学習同定法²⁾に基づきフィルタ係数を逐次修正するものが検討されている^{3, 4, 5)}。

この学習同定法は、真の音響エコー経路を介した信号と模擬音響エコー経路を介した信号の残差を最小とするように、模擬音響エコー経路のインパルス応答を修正するための実時間動作のために簡略化された適応手法の1つである。

学習同定法に基づく適応形音響エコーキャンセラにとって、音響エコー経路の回り込み信号と何ら相関のない暗騒音は、音響エコー経路のインパルス応答を誤同定させる外乱として作用する。また、模擬音響エコー経路のインパルス応答に比べて真の音響エコー経路のインパルス応答が長い（残響時間が長い）場合には、インパルス応答の打ち切り誤差が生じ、この打ち切り誤差も音響エコー経路のインパルス応答を誤同定させる外乱として作用する。このため、暗騒音がある場合や残響時間が長い場合には音響エコーキャンセラのエコー消去量は劣化する⁶⁾。

また、音響エコーキャンセラが適用される音場の特性は系に付加される障害物の影響により複雑に変

化する。通信会議においては送話者が障害物の一つとなり、会議中に送話者が動くことによって音響エコー経路のインパルス応答が変化し、その結果、音響エコーキャンセラのエコー消去量が低下する⁷⁾。

音響エコーキャンセラを拡声通話系に適用する場合には、音響エコー経路の特徴というべきこれらの室内環境の影響を十分に把握しておく必要があるが、この点に関する検討は十分にされているとはいえない。

ここでは、DSP (Digital Signal Processor) で構成した実験装置を用いて、暗騒音と残響音の存在する環境下における音響エコーキャンセラの定常消去特性を検討した。さらに、障害物の影響による音響エコー経路のインパルス応答の変化を求め、この系に音響エコーキャンセラが適用された場合のエコー消去量の変化を検討した。

2. 音響エコーキャンセラの概要

2.1 音響エコーキャンセラの構成

音響エコーキャンセラの構成を図1に示す。音響エコーキャンセラは、受話入力信号 X と受話入力信号が音響エコー経路を介した回り込み信号 y^* とから、音響エコー経路のインパルス応答 h を推定し、推定されたインパルス応答 $\hat{h}$ と受話入力信号 X から模擬回り込み信号 $\hat{y}^*$ を生成し真の回り込み信号 y^* から差し引き、これを消去するものである。音響エコー経路のインパルス応答 h はFIRフィルタ $\hat{h}$ で模擬する。スピーカ、マイクロホン、音場からなる音響エコー経路は、人の移動や周囲の環境によって変化するため、FIRフィルタは適応形のものが使われる。この適応形FIRフィルタの係数 $\hat{h}$ は、実時間で逐次修正される。

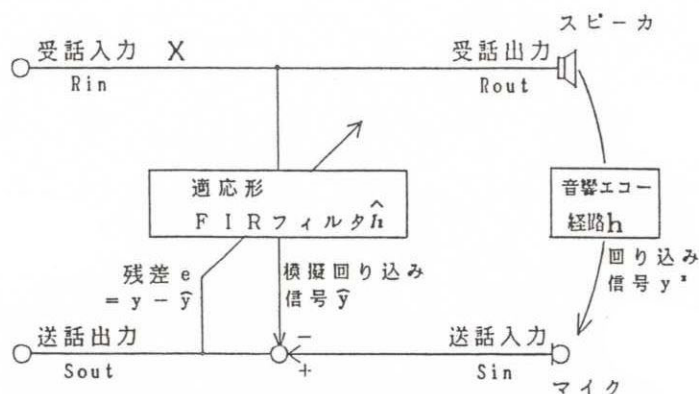


図1 音響エコーキャンセラの構成

2.2 学習同定法の概要

未知の系の伝達特性を同定するためのアルゴリズムは制御理論の分野で種々提案されているが^{8), 9)}、ここでは、アルゴリズムが簡単で比較的良好な消去特性が得られる学習同定法²⁾を使用した。音響エコーキャンセラをデジタル回路で構成することを前提として以下すべての変数をサンプル値表現し、サンプル時間間隔Tの整数k倍における関数値をf(k)と表す。

音響エコー経路のインパルス応答h(k)と入力信号X(k)を用いれば、音響エコー経路の回り込み信号y(k)は、

$$y(k) = \mathbf{h}^T(k) \cdot \mathbf{X}(k) \quad (1)$$

と表される。ただし、

$$\mathbf{h}(k) = (h(1), h(2), \dots, h(n))^T$$

$$\mathbf{X}(k) = (x(k), x(k-1), x(k-2), \dots, x(k-n+1))^T$$

^T : ベクトルの転置

である。一方、h(k)の推定値をh-hat(k)とすれば、y(k)の推定値y-hat(k)は

$$\hat{y}(k) = \hat{\mathbf{h}}^T(k) \cdot \mathbf{X}(k) \quad (2)$$

で与えられる。学習同定法によるh-hat(k)の逐次修正は、

$$\hat{\mathbf{h}}(k+1) = \hat{\mathbf{h}}(k) + \frac{\alpha \cdot e(k)}{\|\mathbf{X}(k)\|^2} \cdot \mathbf{X}(k) \quad (3)$$

によって行われる。ただし、

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (4)$$

$0 < \alpha < 2$

$\|\mathbf{X}\|$: Xのノルム

であり、e(k)を残差と呼ぶ。αはステップ・ゲインと呼ばれ $0 < \alpha < 2$ において(3)式が収束する。

2.3 エコー消去量

音響エコーキャンセラの性能を表す量としてエコー消去量を用いる。

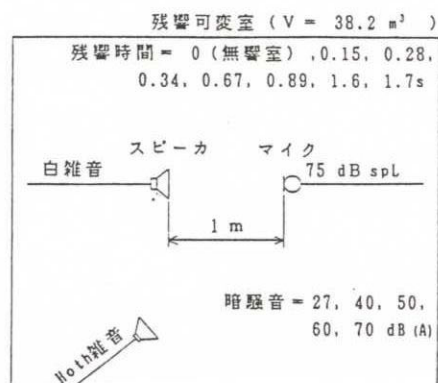


図2 音響系の設置条件

$$\text{エコー消去量} = 10 \log \frac{y^* \text{ の電力}}{e^* \text{ の電力}} \text{ (dB)} \quad (5)$$

エコー消去量は、回り込み信号y*と残差信号e*の電力の比であり、ここでy*およびe*はyおよびeから雑音を除いた値である。回り込み信号y*と雑音Nとの無相関性を仮定すれば、学習同定法を用いた場合の定常消去量は(6)式に示すように、回り込み信号y*に加わる雑音Nによって劣化する¹⁰⁾。

$$\text{エコー消去量} = S/N$$

$$+ 10 \log \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \quad (6)$$

ここにS/Nは送話入力における回り込み信号y*対雑音Nのレベル比である。

3. 定常消去特性

3.1 エコー消去量に影響を及ぼす雑音

音響エコーキャンセラを室内環境に適用する場合の雑音としてハードウェア構成に伴う雑音、暗騒音、インパルス応答の打ち切りによる雑音を取りあげ、これらがエコー消去量に及ぼす影響を定量化する。

これらの雑音の特徴を以下に示す。

(1) ハードウェア構成に伴う雑音Nwは、室内の音響条件によらず、ハードウェアの設計により決定される雑音であり、音響エコーキャンセラの送・受話入力信号と何ら相関が無く一定値をとる。

(2) 暗騒音Nnは回り込み信号に音響的に加わる雑音であり、空調音、機器騒音など周囲物体から放出される音波に起因する。暗騒音Nnも音響エコーキャンセラの送・受話入力信号と何ら相関が無く一定値をとる。

(3) 本質的に無限長の継続時間を持っている音響エコー経路のインパルス応答に対して模擬音響エコー経路を構成するFIRフィルタは有限長であるため、

FIRフィルタのタップ長より長いインパルス応答成分は音響エコーキャンセラにとって雑音となる。この雑音のレベルは音響エコーキャンセラの入力信号レベルに比例し、信号成分は受話入力信号と相関を有する。

なお、これらの雑音の個々の絶対レベルが明らかなき全体の雑音レベルは

$$N_{total} = N_w + N_n + N_h \quad (7)$$

として、また、これらの雑音の個々のS/Nが明らかなき全体のS/Nは

$$[S/N]_{total} = -10 \log (10^{-S/N_w/10} + 10^{-S/N_n/10} + 10^{-S/N_h/10}) \quad (8)$$

として求められる。

3.2 実験方法

マイクロホン、スピーカを壁面の吸音性能を変えることにより残響時間の可変なブース内に設置し、残響時間(0~1.7秒, 8設定)と暗騒音レベル(27~70dB(A), 5設定)を変えて定常消去特性を測定した。音響系の設置条件を図2に示す。実験に使用した音響エコーキャンセラは、帯域3.8kHz, エコー消去時間144msecであり、ステップ・ゲイン α は0.5とした。

3.3 ハードウェア構成に伴う雑音とエコー消去量

音響エコーキャンセラをハードウェアで構成する場合には、ハードウェア構成に伴う雑音 N_w がエコー消去量を事実上制限する。ハードウェア構成に伴う雑音 N_w のみの影響を明らかにするため、エコー経路としてアッテネータを使用した場合の定常消去特性を測定した。受話入力レベル(R_{in})に対する送話入力レベル(S_{in})、送話出力レベル(S_{out})、エコー消去量を図3に示す。図3から、 S_{in} は R_{in} に比例して増加し、 S_{out} はハードウェア構成に伴う雑音 N_w にマスクされ一定値となる。そのためエコー消去量は受話定格レベルに至るまで R_{in} に比例することがわかる。

3.4 暗騒音とエコー消去量

無響室において暗騒音レベルを変えた場合の受話入力レベル(R_{in})に対する送話入力レベル(S_{in})、送話出力レベル(S_{out})を図4に、エコー消去量を図5に示す。図4,5から S_{in} は R_{in} に比例して増加し、 S_{out} は R_{in} にはよらず暗騒音レベルに応じて一定値となる。そのためエコー消去量は R_{in} に比例することがわかる。

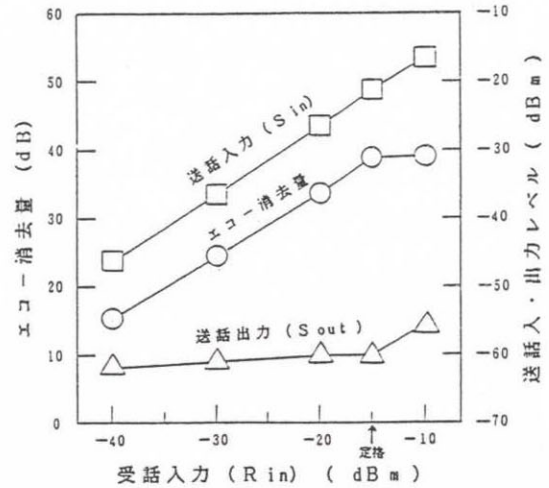


図3 アッテネータをエコー経路とした場合の信号レベルとエコー消去量

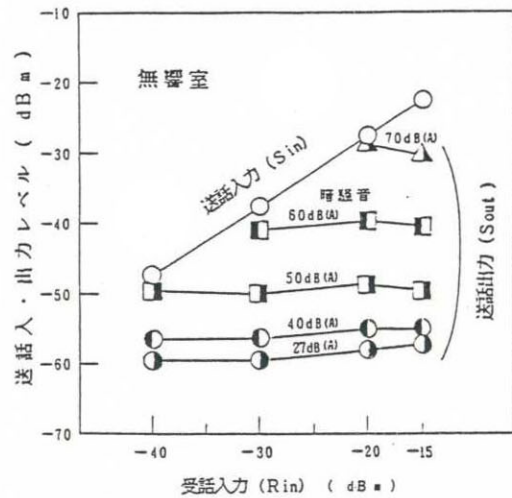


図4 暗騒音レベルを変化させた場合の受話入力レベルと送話入・出力レベル

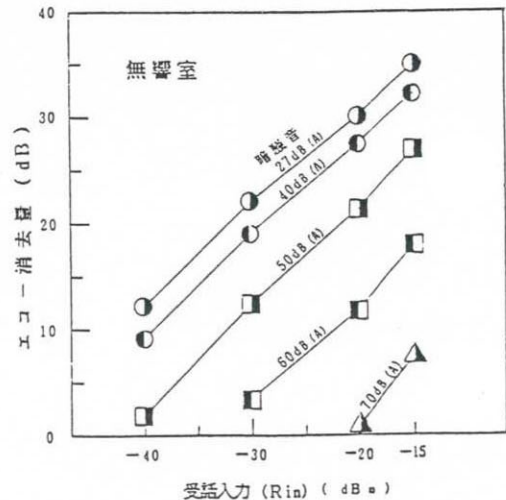


図5 暗騒音レベルを変化させた場合の受話入力レベルとエコー消去量

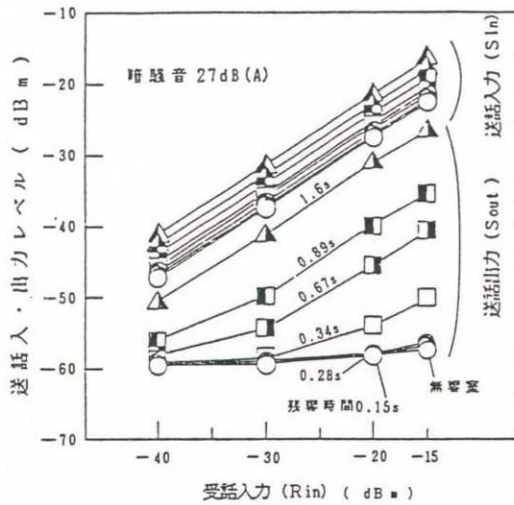


図6 残響時間を変化させた場合の受話入力レベルと送話入・出力レベル

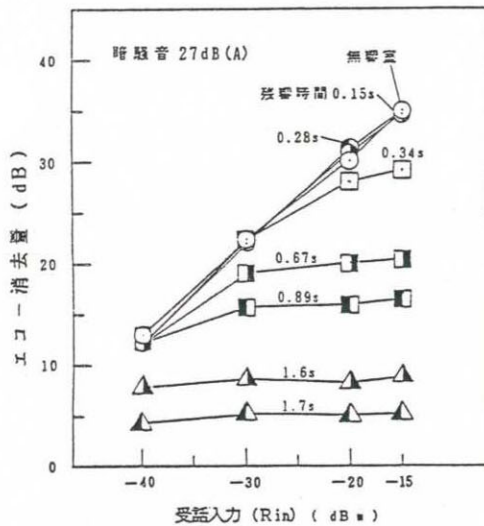


図7 残響時間を変化させた場合の受話入力レベルとエコー消去量

3.5 残響時間とエコー消去量

暗騒音27dB(A)において残響時間を変えた場合の受話入力レベル(Rin)に対する送話入力レベル(Sin)、送話出力レベル(Sout)を図6に、エコー消去量を図7に示す。図6,7からSinはRinに比例して増加し、Soutは残響時間が長くインパルス応答の打ち切りによる雑音N_hがハードウェア構成に伴う雑音N_wより支配的となる範囲では、Rinに比例して増加する。その結果、残響時間が長い場合には、エコー消去量はRinによらず、一定値となる。

3.6 暗騒音と残響音が混在する場合のエコー消去量

受話入力(Rin)定格レベルにおいて残響時間を変えた場合の暗騒音N_nとエコー消去量の関係を図8に示す。破線は、(6)式を用いた場合の推定値であり、

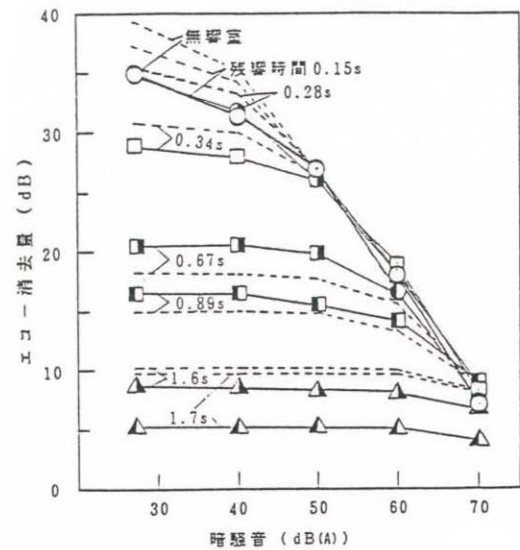


図8 暗騒音とエコー消去量

受話入力定格レベル
—— 実験値
----- 測定したS/Nからの推定値

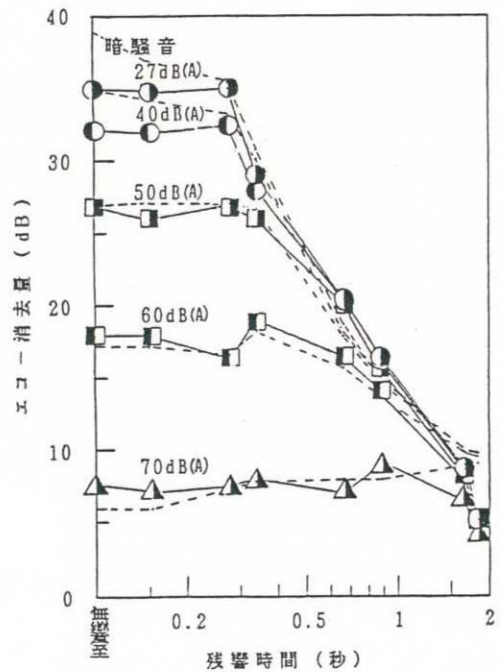


図9 残響時間とエコー消去量

受話入力定格レベル
—— 実験値
----- 測定したS/Nからの推定値

雑音N_{total}中の各雑音レベルには測定値を用いた。暗騒音が大きくなるに従い、エコー消去量は破線によく一致して小さくなるのがわかる。

次に、受話入力(Rin)定格レベルにおいて暗騒音を変えた場合の残響時間とエコー消去量の関係を図9に示す。破線は、(6)式を用いた場合の推定値で

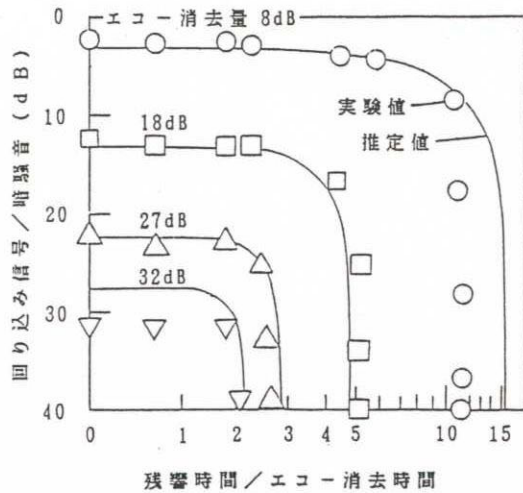


図10 室内環境と定常消去量（等高線図）

あり、雑音 N_{total} 中の各雑音レベルには測定値を用いた。残響時間が大きくなるに従い、エコー消去量は破線によく一致して小さくなることがわかる。

3. 7 考察

以上の実験結果から求めたエコー消去量の等高線図を図10に示す。室内環境を表す暗騒音 N_n および残響時間は、回り込み信号 y^* およびエコー消去時間でそれぞれ基準化してある。図中推定値は(6)式における雑音 N_{total} としてハードウェア構成に伴う雑音 N_w 、暗騒音 N_n 、インパルス応答の打ち切りによる雑音 N_h の和を用いた場合の推定値であり、各雑音レベルには測定値を用いた。実験値と推定値はよく対応している。図10から、音響エコーキャンセラのエコー消去量が暗騒音と残響時間によって制限される様子がわかる。大きなエコー消去量を得るためには、暗騒音と残響時間の両方のバランスに注意して室内環境を整える必要があることがわかる。

4. インパルス応答の変動と定量化

4. 1 インパルス応答の変動と定量化

通信会議においては送話者が障害物の一つとなり、会議中に送話者が動くことによって音響エコー経路のインパルス応答が変化し、その結果、音響エコーキャンセラのエコー消去量が低下する。ここではこの問題を定量化する。障害物がない場合の音響エコー経路のインパルス応答を h_1 、この音響エコー経路に障害物が置かれた場合のインパルス応答を h_2 とする。図11に示すように、障害物による音波の反射・吸収により h_2 は h_1 から変化している。音響エコー経路の変動量を定量化し客観的評価を与えるために、2つのインパルス応答の各係数の変化に着目した評価関数 ΔH

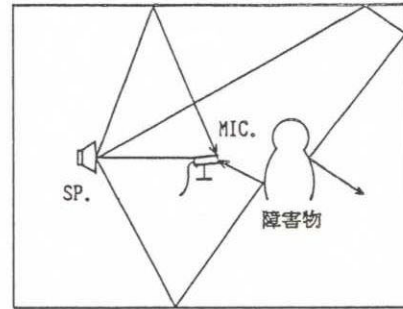


図11 障害物によるインパルス応答の変動

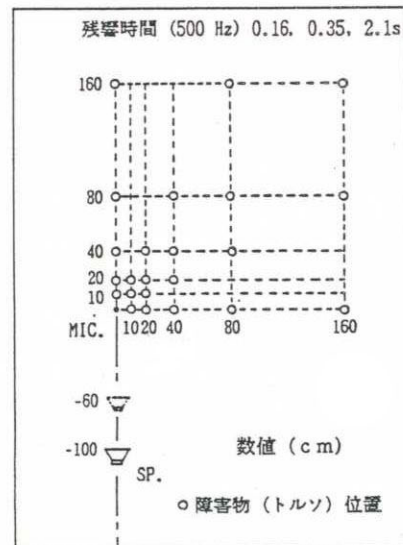


図12 スピーカ、マイクロホン、障害物の配置

$$\Delta H = 10 \log_{10} \frac{\|h_2\|^2}{\|h_2 - h_1\|^2} \quad (9)$$

h_1 : 変動前のインパルス応答

h_2 : 変動後のインパルス応答

を導入する。この評価関数 ΔH は、 h_1 に収束していた音響エコーキャンセラに対して音響エコー経路が h_2 に変化した直後の音響エコーキャンセラのエコー消去量に対応する。

4. 2 実験

スピーカ、マイクロホンを、ブース（残響時間（500 Hz）0.16, 0.35, 2.1 秒）内に設置し、音響エコー経路に障害物（ここでは、人間の代用としてトルソを用いる）を置くことにより音響エコー経路のインパルス応答を変化させる。通信会議を想定し、スピーカ、マイクロホン、障害物を図12に示すように配置する。スピーカとマイクロホンの距離は60cm および 100cm とし、障害物はスピーカ・マイクロホ

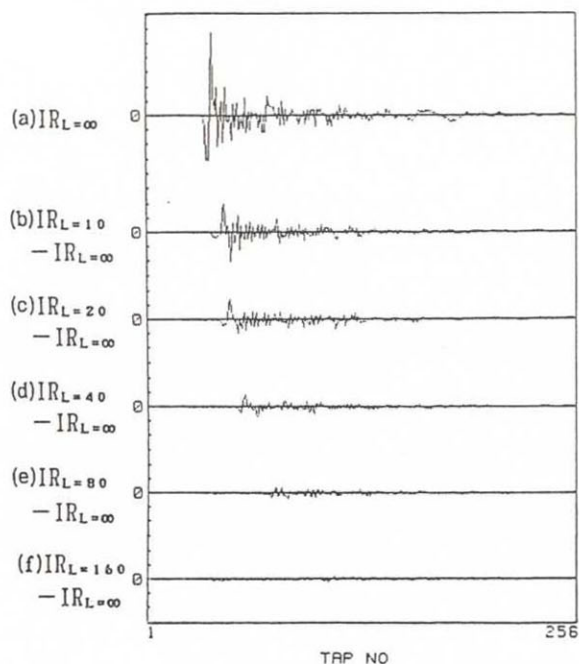


図13.1 障害物の有無によるインパルス応答の変化
(残響時間 (500 Hz) 0.16秒)

ンの延長線上から直角方向の間でマイクロホンから10～160cmの距離の点に置いた。

4. 3 実験結果

障害物の有無による音響エコー経路のインパルス応答の変化を図13.1～13.3に示す。同図において(a)は障害物がない場合のインパルス応答、(b)～(f)はマイクロホンから距離Lの点に障害物を置いたときのインパルス応答から(a)を差し引いた残差、すなわちインパルス応答の変化量を表す。

図13.1(残響時間 0.16 秒)では残響時間が短い
ため、直接音および低次の反射音が支配的である。
インパルス応答の直接音を表す部分には変化がなく、
マイクロホン・障害物間距離Lが長くなるに伴って
障害物からの反射音を表す部分以後が変化し、また、
その変化量は少なくなりL = 160ではほとんど無視
できる程度にまで減少している。すなわち、残響時
間 0.16 秒のときには、マイクロホンから 160cmの
点に人間が現れても、インパルス応答の変化は非常
に少ない。これに対して図13.2(残響時間 0.35 秒)
ではマイクロホン・障害物間距離Lが長くなるに伴
ってインパルス応答の変化量は少なくなっているも
の、L = 160においてもなお、直接音よりかなり
遅れた部分にまで変化が残っている。この傾向は図
13.3(残響時間 2.1秒)ではさらに増加し、マイク
ロホン・障害物間距離Lが長くなってもインパルス
応答の変化量は同様の傾向を示し、L = 160におい

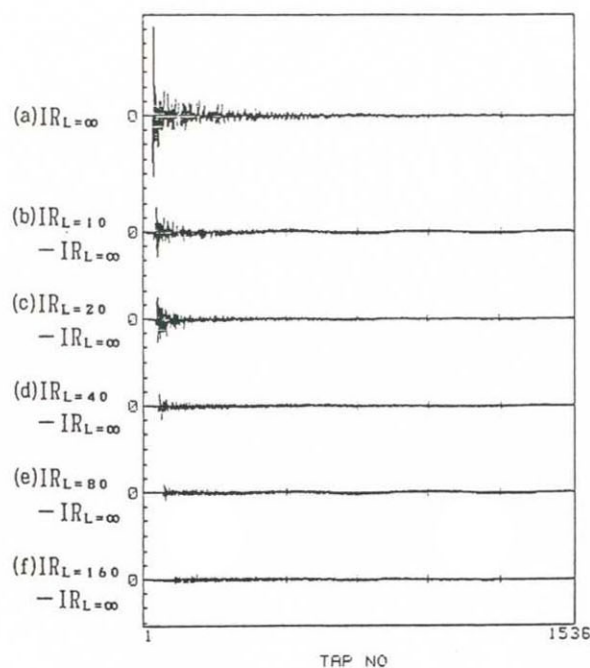


図13.2 障害物の有無によるインパルス応答の変化
(残響時間 (500 Hz) 0.35秒)

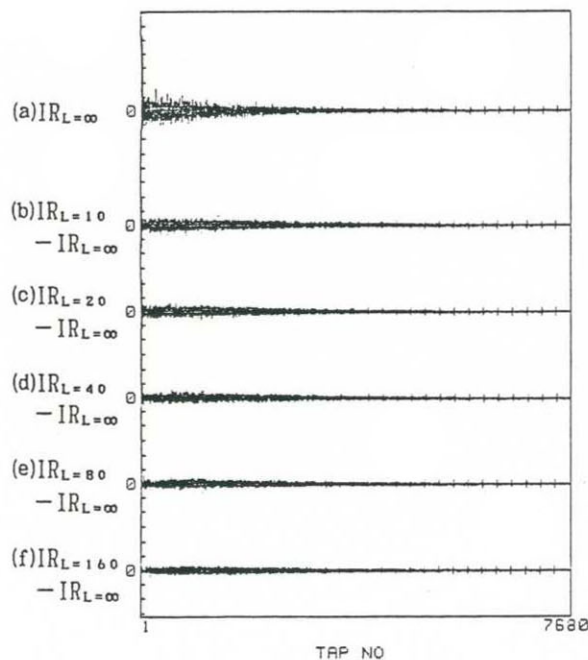


図13.3 障害物の有無によるインパルス応答の変化
(残響時間 (500 Hz) 2.1秒)

てもインパルス応答が大きく変化する。すなわち、
残響時間 2.1秒のときには、マイクロホンから 160
cmの点に人間が現れると、インパルス応答は大きく
変化する。

次に、実測したインパルス応答 h_1 , h_2 を用い

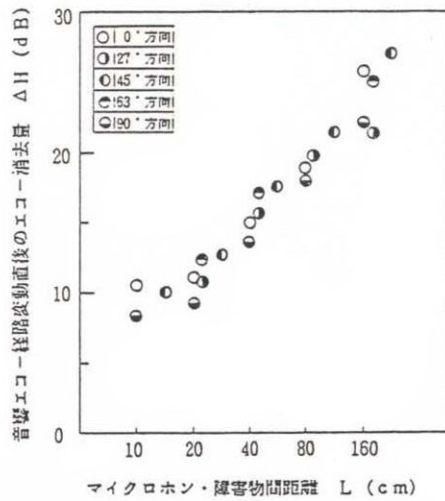


図14.1 音響エコー経路変動直後のエコー消去量
残響時間 (500 Hz) 0.16秒
スピーカ・マイクロホン 100cm

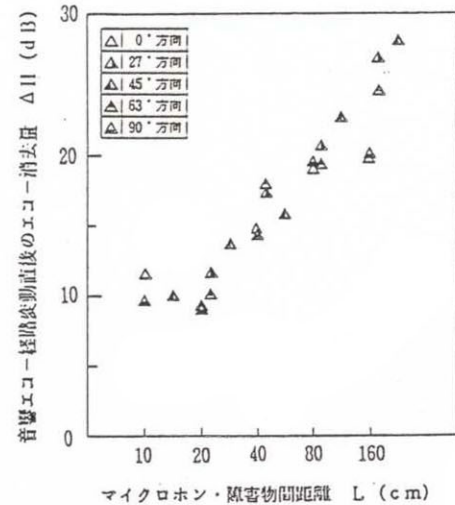


図14.4 音響エコー経路変動直後のエコー消去量
残響時間 (500 Hz) 0.16秒
スピーカ・マイクロホン 60cm

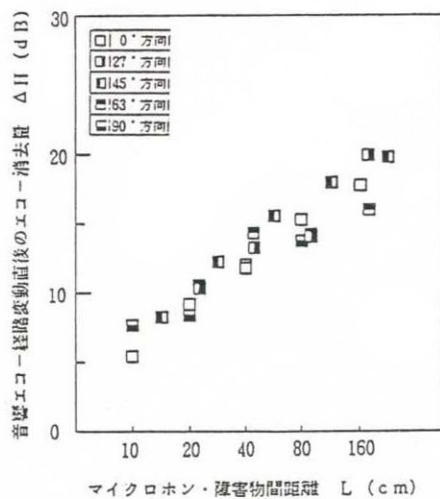


図14.2 音響エコー経路変動直後のエコー消去量
残響時間 (500 Hz) 0.35秒
スピーカ・マイクロホン 100cm

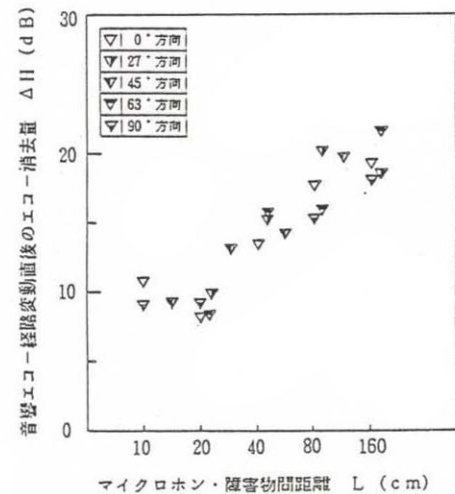


図14.5 音響エコー経路変動直後のエコー消去量
残響時間 (500 Hz) 0.35秒
スピーカ・マイクロホン 60cm

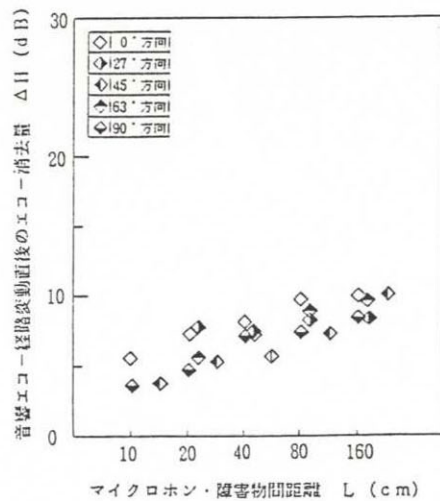


図14.3 音響エコー経路変動直後のエコー消去量
残響時間 (500 Hz) 2.1 秒
スピーカ・マイクロホン 100cm

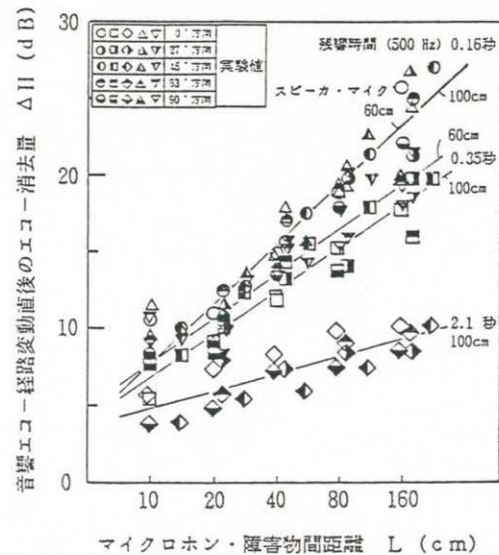


図14.6 音響エコー経路変動直後のエコー消去量

て(9)式に従って ΔH を計算した。マイクロホン・障害物間距離 L と ΔH の関係を図14.1~14.5に示す。図14.1~14.5ともに、 L の増加に伴って ΔH はほぼ直線的に増加している。その傾きは残響時間が大きくなるに伴って小さくなっている。図14.1~14.5を比較のためにまとめて図14.6に示す。図中の直線は、最小自乗法により求めた回帰直線である。図14.6から、障害物がない状態で収束していた音響エコーキャンセラは、障害物をマイクロホンから距離 L の点に置くことによりエコー消去量が低下し、その値は、
 ①残響時間が長くなるほど小さくなる
 ②マイクロホン・障害物間距離の対数に比例して大きくなる
 ③その傾きは残響時間が長くなるほど小さくなる
 ことがわかる。

4. 4 考察

以上の実験結果から次の点が推察される。

(i) 残響時間の影響

音の減衰効果のため、伝播時間が長くなるほどインパルス応答のレベルは小さくなる。一方、伝播時間が長くなるほど1本の音線が障害物に衝突する確率が高くなり、インパルス応答の変化が大きくなる。残響時間が短い場合には、前者による減衰効果が大きく後者の効果は小さい。残響時間が長い場合には、両者の効果がともに大きい。その結果、残響時間が長くなるほどインパルス応答の変化が大きくなり、 ΔH は小さくなる。

(ii) マイクロホン・障害物間距離 L の影響

障害物がないときにマイクロホンに到達する壁からの反射音は、障害物があるときには障害物に遮られてマイクロホンに到達しないと考えると、遮られる反射音の数はマイクロホンから障害物を見た立体角に比例し、この立体角はマイクロホン・障害物間距離 L に反比例する。その結果、障害物がマイクロホンから遠ざかるほどインパルス応答の変化は少なくなり、 ΔH は大きくなる。

エコー消去量の低下を防止するためには、残響時間の短い会議室を使用し、送話者がマイクロホンからの距離を保つことが必要であり、音響エコーキャンセラに対しては音響エコー経路の上記変化に追隨できる収束速度を持つことが要求される。

5. あとがき

適応形FIRフィルタで構成し学習同定法を用いてフィルタ係数を逐次修正する音響エコーキャンセラについて、暗騒音と残響音の存在する環境下における定常消去特性を明らかにした。さらに、障害物の影響による音響エコー経路のインパルス応答の変

化を評価し、この系に音響エコーキャンセラが適用された場合のエコー消去量の変化を明らかにした。その結果、

- (1) 音響エコーキャンセラのエコー消去量は暗騒音と残響時間によって制限される。十分なエコー消去量を得るためには、暗騒音と残響時間の両方のバランスに注意して室内環境を整える必要がある。
- (2) 障害物がない状態で収束し、その後、障害物が置かれた直後の音響エコーキャンセラのエコー消去量は、①残響時間が長くなるほど小さくなる、②マイクロホン・障害物間距離の対数に比例する、③その傾きは残響時間が長くなるほど小さくなる。

ことが明らかになった。

実使用に際しては暗騒音や残響音のほかに入力信号に無相関で非定常な送話音声も外乱として作用し、インパルス応答を誤同定させエコー消去量を劣化させる。これら音響エコーキャンセラの動特性に関する検討および適応アルゴリズムへの反映が今後の課題である。

謝辞 日頃御指導頂く複合端末研究室川嶋室長、及川主幹研究員に深謝します。

参考文献

- 1) C.W.K.Gritton, D.W.Lin: "Echo Cancellation Algorithms", IEEE ASSP MAGAZINE, APRIL, 1984, pp.30 ~ 38.
- 2) 野田, 南雲: "システムの学習同定法", 計測と制御, 7巻, 9号, pp.597~605 (昭43-9).
- 3) 伊藤, 他: "テレコンファレンスにおけるエコー制御システム", 信学技報, E A83-5.
- 4) Furukawa: "A DESIGN OF CANCELLER FOR BROAD BAND ACOUSTIC ECHO", ITS, 5th, April, 1984, pp.232~432.
- 5) 古川, 他: "エコーキャンセラの拡声電話機への適用性評価", 昭60信学総全大, No.2306.
- 6) 牧野, 小泉, "音響エコーキャンセラの室内環境における定常特性について", 音講論, p.383, (1985, 10).
- 7) 牧野, 小泉, "直方体ブース内の障害物によるインパルス応答の変動について", 音講論, p.295, (1987, 3).
- 8) 鈴木: "システム・アイデンティフィケーション I", 制御工学, 第14巻, 第7号, pp.423~432.
- 9) 鈴木: "システム・アイデンティフィケーション II", 制御工学, 第14巻, 第8号, pp.483~494.
- 10) 板倉, 西川: "学習同定法を用いたエコーキャンセラのエコー打消特性について", 信学論, '77/11, Vol. j60-A No.11.