

伝送距離を考慮した音声伝送の予測手法

Prediction Method of Speech Transmission Performance in Consideration of Transmission Distance

西川 嘉雄*¹ 桂 充宏*¹
Yoshio Nishikawa Mitsuhiro Katsura

要旨

本研究は、残響時間をベースにした音声伝送の物理評価指標 STI (Speech Transmission Index) の予測手法の精度を上げることである。本報告では音源と受音点間の距離に着目し、音声伝送性能指標 STI の予測について検討を行った。距離を考慮した STI の予測式が拡散音場の予測式に比べ対応が良かったことが確認された。この式を使用することで STI が予測できることが示されたが、より正確に予測するには、音源指向性、反射面の位置およびノイズの考慮などを更に検討する必要がある。

キーワード：残響時間 STI 聴き取り易さ 受聴位置 音源指向特性

1. はじめに

音声伝送による情報伝達は、コミュニケーションの重要な手段であり、音声伝送性能を確保することは、建築空間や都市空間において重要な課題といえる。この背景から、日本建築学会では音声伝送評価基準の作成に向けた活動が行われている¹⁾。音声伝送品質のランクは「聴き取りにくさ」と「単語理解度」の主観評価実験に基づいて設定を行っている。この評価と対応の良い物理指標を検討し、設計に生かせるよう対応している。

一方、測定方法の整備として、音源スピーカの検討を行っている。音声伝送性能の測定では、話者の指向性に近似した音源を用いて測定することが好ましく、写真1に示す単一指向性音源の測定用スピーカの提案もされている^{2),3)}。また、建築音響測定には12面体スピーカなどの無指向性音源が用いられ、既報で指向性の違いによる物理指標の差の

考察を、音場データベースにより検討している⁴⁾。

このような状況から、音声伝送に関する設計手法を整備することが重要である。当社では、残響時間をベースにした音声伝送の予測手法の整備を行っている。本報告では予測精度を向上させるために、音源と受音点間の距離に着目し物理指標の関わりと STI の予測について検討を行ったので報告する。

2. 検討物件および測定・分析方法

本報告では、実測データを基に検討を行う。この章では、検討物件と測定方法の概要を整理する。

2.1 検討物件

竣工測定などで収集したデータから音源-受音点の距離が確認できるデータを抽出し検討に用いる。



a) 無指向性音源：12面体SP



b) 単一指向性音源：単一SP



c) 単一指向性音源：AIJ音源SP

写真1 測定用音源

*1 技術研究所 建築技術研究部門

測定室の条件を表1に示す。記号aは会議室・講義室で、室容積は70m³の小会議室から1,200m³の大会議室まで全14室である。記号bは体育館・講堂で室容積1,800~3,500m³の5室である。記号cはその他の空間で、7 m³のピアノ練習室、アトリウム、執務室、音楽室、簡易無響室、地下ピットなど9室である。これらの合計28室を検討物件とし、音源スピーカ、カーテンの開閉、吸音材料付加などの条件の違いにより、合計78室条件(619測定点)のデータを用いて考察を行う。

2.2 測定・分析方法

測定系統図を図1に示す。音源スピーカは、無指向性音源(小野測器 SJ-1810)と単一指向性音源(BOSE101,AIJ音源スピーカ)を用いた(写真1)。音源の種類については、「建築空間自体の音響特性」の把握を目的とした測定では、写真1a)に示す無指向性音源(12面体スピーカ)が用いられる。しかし、「音声伝送特性」の把握を目的とした測定では、音声を取り扱うことから、話者の指向性を近似した単一指向性音源(写真1 b),c))を用いることが望ましい。また、日本建築学会音声伝送WGでは、音声伝送測定用の音源スピーカの提案を行っている^{2),3)}。

受音は無指向性マイクロホン(RION UC-30、UN-04)を用いた。計測器は、Coretex 製 CTX7010,1040(TSP法:time-stretched pulse)を用い、インパルス応答測定のみを行う。

分析は、表2に示す物理評価指標の残響時間,D50,C80,ts,MTI,STIを自作ソフトにより算出した。算出フローチャートを図2に示す。インパルス応答ファイルを読み込み、Windows標準形式のWAVファイル(サンプリング周波数48kHz,16bit)に変換する。次にオクターブバンド(6次バターワース型IIRフィルタ)で125Hz~8kHzの7帯域に分割し、物理評価指標を算出した。

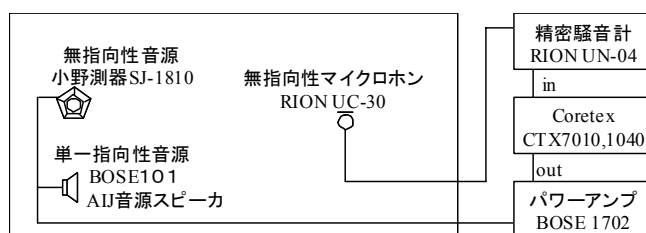


図1 測定系統図

表2 主要な室内音響評価指標一覧

物理指標	定義と特徴
残響時間 T	音のエネルギーが60dB減衰するまでの時間
初期残響時間 EDT	0~-10dBの減衰から求めた残響時間
時間重心 ts	波形の重心を求める。 初期反射音の減衰を表す。
STI・RASTI	話し声の変調の低減度(MTF)により求められる指標(0~1)
D値(Deutlichkeit) D50	50msecまでの音エネルギー(直接音)と全時間の音エネルギーの比
C値(Clarity) C80	0~80msecと80 msec~∞の比のレベル表示

表1 測定室条件一覧

	室容積 V(m ³)	表面積 S(m ²)		室容積 V(m ³)	表面積 S(m ²)
a1	70	110	b1	1,800	1,200
a2	110	160	b2	2,200	1,400
a3	170	180	b3	2,800	1,500
a4	190	220	b4	3,200	1,500
a5	190	230	b5	3,500	1,600
a6	240	270	c1	7	23
a7	490	480	c2	80	120
a8	650	640	c3	180	160
a9	730	650	c4	420	430
a10	740	640	c5	421	428
a11	750	650	c6	440	460
a12	770	840	c7	1,000	770
a13	930	840	c8	3,500	2,100
a14	1,200	1,000	c9	3,500	2,100

a: 会議室・講義室, b: 体育館・講堂,
c: その他(アトリウム、音楽室、無響室など)

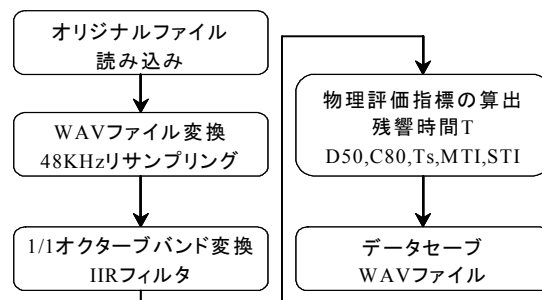


図2 物理評価指標算出フローチャート

STI^{5),6)}の算出方法を以下にまとめる。MTF(m(F))の原理とSTIを求めるまでの概要を図3に示す。

MTF(m(F))とインパルス応答の関係は、式(1)により表され、125Hz~8kHzの7オクターブバンド、0.63~12.5Hzの14変調周波数の計98のMTFを算出する。以下にMTF(m(F))からSTIを求める手順を示す^{7),8)}。

$$m(F) = \frac{\left| \int_0^{\infty} h^2(t) e^{-i2\pi Ft} dt \right|}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (1)$$

h(t) : インパルス応答, F : 変調周波数(Hz) 0.63~12.5Hz

聴覚マスキングを考慮して

$$m'_{k,F_i} = m_{k,F_i} \cdot \left[I_k / (I_k + AMF \cdot I_{k-1}) \right] \quad (2)$$

m_{k,F_i} : オクターブバンド分割した MTF

m'_{k,F_i} : 聴覚マスキングを考慮した MTF

I_k : オクターブバンド k の信号の強さ

AMF(=0.0003) Auditory Masking Factor : 聴覚マスキング因子

見かけの S/N 比 (SNR_{k,F_i}) を式(3)より求める。

$$SNR_{k,F_i} = 10 \log [m'_{k,F_i} / (1 - m'_{k,F_i})] \quad (3)$$

式(4)により TI_{k,F_i} ($0 \leq TI_{k,F_i} \leq 1$) を算出する。

$$TI_{k,F_i} = \frac{SNR_{k,F_i} - S}{R} \quad (4)$$

S (=−15dB) : S/N 比の端点で最小寄与 0 が得られるシフト因子

R (=30dB) : 考慮すべき等価 S/N 比の範囲

TI_{k,F_i} をオクターブバンド毎に算術平均して MTI_k を求める。

$$MTI_k = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} TI_{k,F_i} \quad (5)$$

STI は MTI_k を重み付け平均して算出する。

$$STI = \sum_{k=1}^7 W_k \cdot MTI_k \quad (6)$$

$W_1(125)=0.129, W_2(250)=0.143, W_3(500)=0.114,$

$W_4(1k)=0.114, W_5(2k)=0.186, W_6(4k)=0.171, W_7(8k)=0.143$

3. 測定データの検討

3.1 残響時間と STI の関係

測定点毎の残響時間と STI の関係を図4,5に示す。また、式(7)⁹⁾の MTF(m(F))から、式(3)~(5)の計算により MTI を算出する。この MTI を拡散音場の STI として、図にプロッ

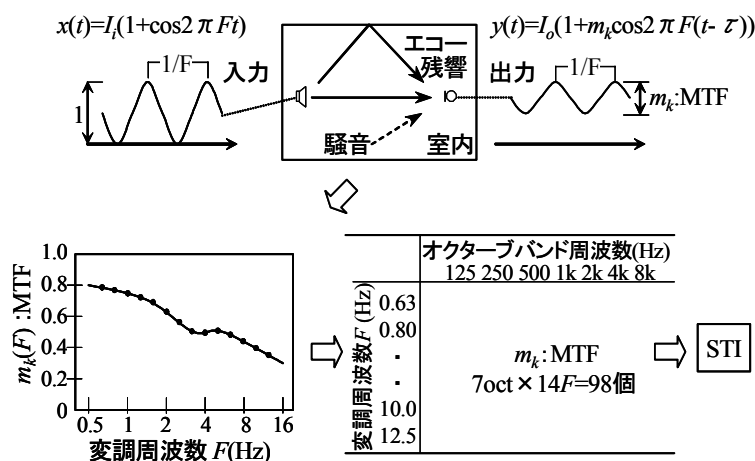


図3 MTF(m(F))の原理と STI を求めるまでの概要

トした。本報告ではこの値を『拡散音場の STI』と呼ぶこととする。

$$m(F) = \left[1 + \left(\frac{2\pi FT}{13.8} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (7)$$

T : 残響時間(s), F : 変調周波数(Hz)0.63~12.5Hz

残響時間と STI は負の相関があり、残響時間が長くなると STI の値は低下する。

実測値は拡声音場の STI を下限として同じ残響時間でも STI の値は大きくなり、幅広く分布している。

単一指向性音源と無指向性音源を比較すると同じ残響時間で、単一指向性音源の方が STI 値が良い傾向が見られる。また、簡易無響室 (T=0.1, STI=0.98) は拡散音場 STI と同程度であるが、地下ピット (T=5.5~6.5sec, STI=0.4~0.6) は拡散音場の STI (T=6sec, STI=0.23) より上部に分布し

ており、残響時間が長くなっても STI の数値は 0.4 以下にはならなかった。

以上から式(7)を用いて、残響時間における STI の下限値を推測することには可能だが、残響時間から STI を推定することは困難であることが示唆された。

また、参考までに図 6,7 に EDT (初期残響時間) と STI の関係を示す。残響時間と比較すると同じ数値の残響時間・EDT に対して、STI の分布幅が狭くなる。しかし、単一指向性の方が無指向性より、STI 値が良くなる傾向は残響時間と同じである。

3.2 距離と物理指標の関係

STI と距離の関係を無指向性音源と単一指向性音源に分けて図 8,9 に示す。500Hz の残響時間の長さにより区別して表した。T=0.4sec 以下 (○) は簡易無響室と吸音性の高い音楽室であり、距離に関わらず簡易無響室は STI=0.98 程度である。

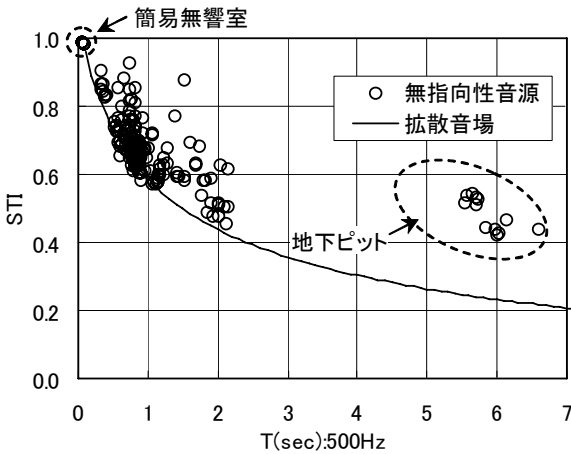


図4 残響時間と STI の関係：無指向性音源

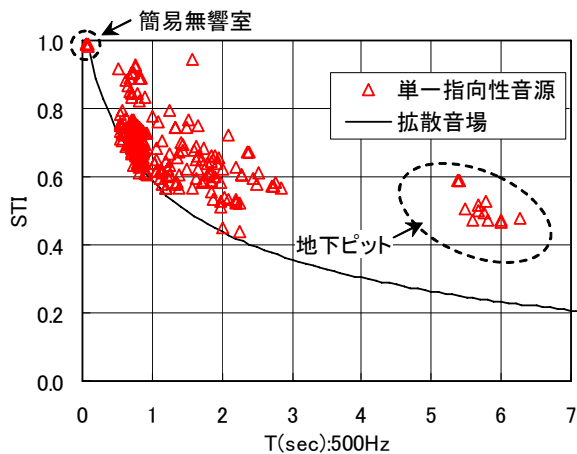


図5 残響時間と STI の関係：単一指向性音源

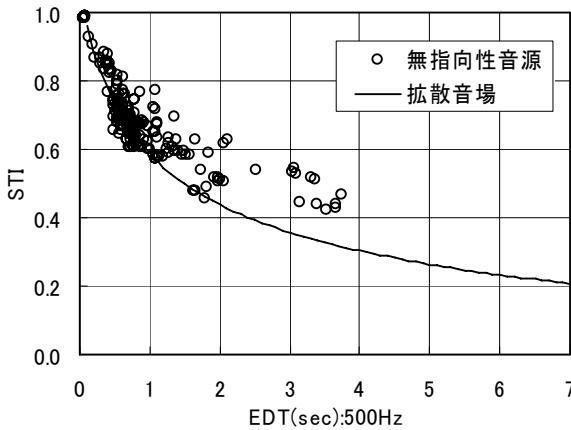


図6 EDT と STI の関係：無指向性音源

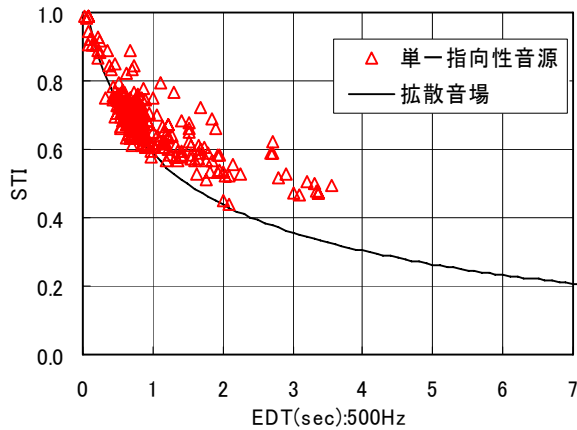


図7 EDT と STI の関係：単一指向性音源

全体的な傾向としては、近距離でSTIは大きく、距離が離れるにしたがって小さくなり次第に一定になる。また、同じ距離でも残響時間が長いとSTIは小さくなる。この傾向は音源の指向性によらず同じである。無指向性音源に比べて単一指向性のSTIが大きい。

無指向性音源、単一指向性音源ともに、STIが0.4のデータはない。

図10, 11に単一指向性のD50およびtsの500Hzと残響時間の結果を示す。

D50はSTIと正の相関であることから全体的な傾向はSTIと同じく、距離が離れるにしたがってD50は小さくなる。しかし、STIは0.4以下の値が無く0.4~1.0に分布している

るのに対して、D50は10~90%で幅広く分布しており、レンジが広い。逆を言えば、残響時間・距離が同程度でもD50の分布範囲は広く残響時間と音源との距離のみではD50は推定できないことを意味している。

TsはSTIと負の相関であることから全体的な傾向はSTIと逆で、距離が離れると数値は大きくなる。

3.3 MTI (STI) の予測値と実測値の比較

拡散音場を仮定した式(7)と距離と室容積を考慮した式(8)⁹⁾に実測の残響時間と室容積、距離を用いて500HzのMTF(m(F))を算出する。更に、式(3)~(5)によりMTI(STI)を算出し実測値と比較を行った。

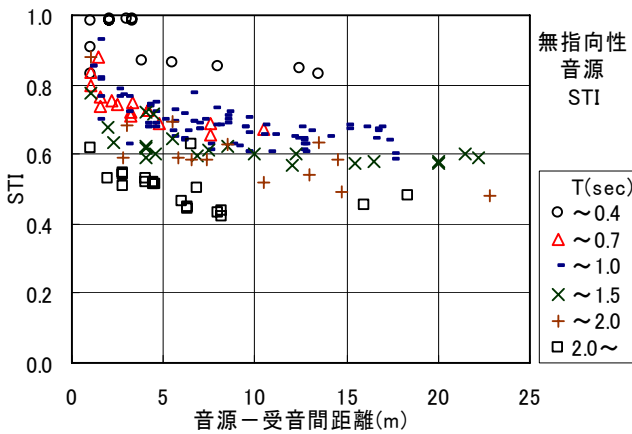


図8 距離とSTIと残響時間の関係
無指向性音源

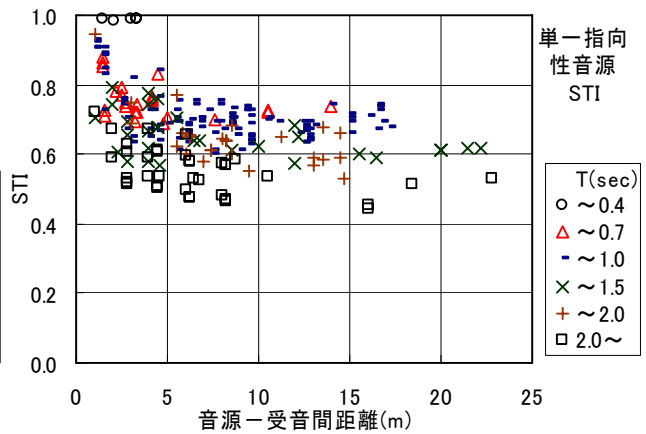


図9 距離とSTIと残響時間の関係
単一指向性音源

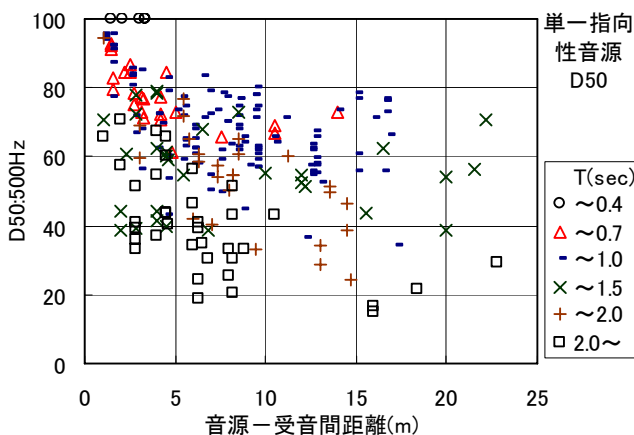


図10 距離とD50:500Hzと残響時間の関係
単一指向性音源

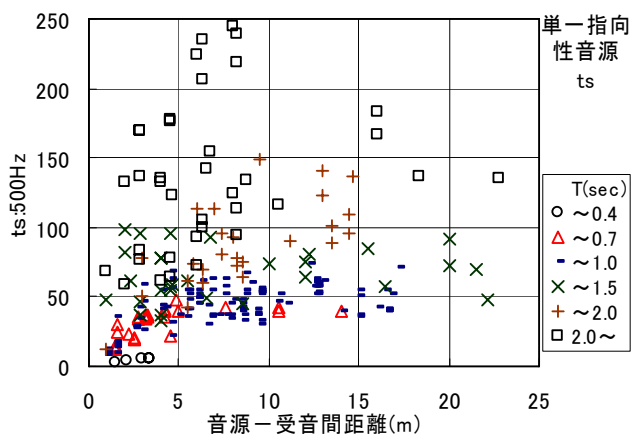


図11 距離とts:500Hzと残響時間の関係
単一指向性音源

拡散音場の結果は図 12 に示すように、予測が実測値を下回る。図 13 に距離考慮 (式(8)) の結果を示す。MTI が大きい範囲は図 12 (点線囲み部) と比較して予測精度が改善しているが、MTI が小さい範囲は図 12 (実線囲み部) と同程度で改善されていない。これは、実測の STI で 0.4 以下がないことが関係していると考えられ、予測精度には改善の余地があり、他の因子を考慮し予測精度を上げる必要がある。

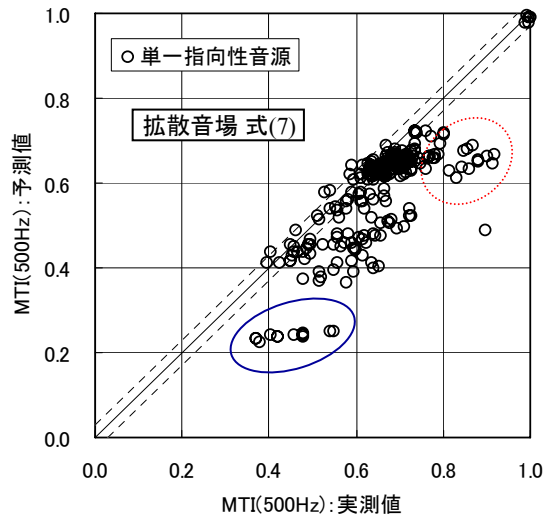
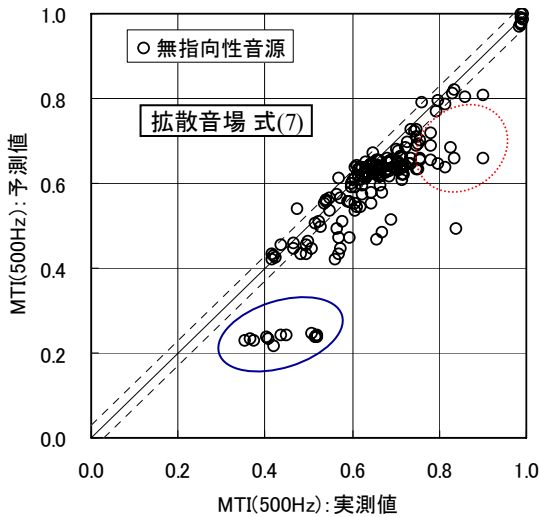
$$m(F) = \frac{(A^2 + B^2)^{1/2}}{C} \quad (8)$$

$$A = \frac{3}{r^2} + \frac{1}{r_c^2} \left[1 + \left(\frac{2\pi FT}{13.8} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$B = \frac{2\pi FT}{13.8} \frac{1}{r_c^2} \left[1 + \left(\frac{2\pi FT}{13.8} \right)^2 \right]^{-1}$$

$$C = \frac{3}{r^2} + \frac{1}{r_c^2}$$

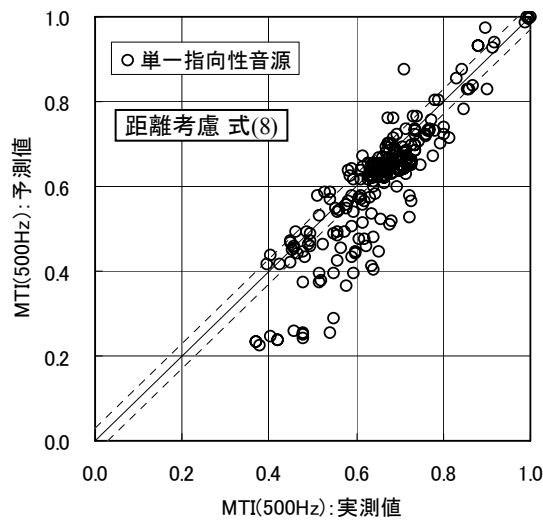
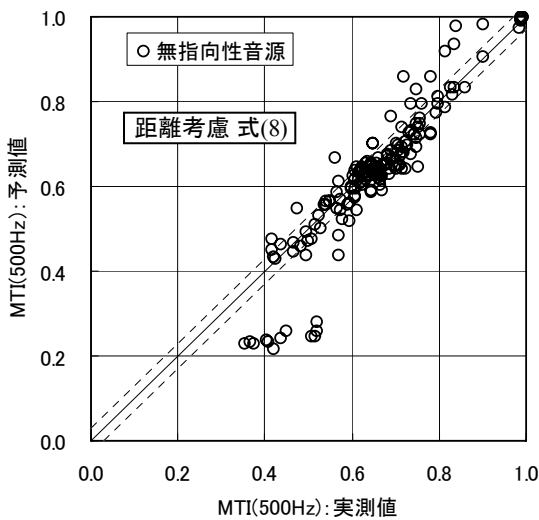
r : 距離 (m), $r_c^2 = 0.0032V/T$ (m), V : 室容積 (m³)
 T : 残響時間 (s), F : 変調周波数 (Hz) 0.63~12.5Hz



1) 無指向性音源

2) 単一指向性音源

図 12 実測値と予測値 (拡散音場 式(7)) の比較



1) 無指向性音源

2) 単一指向性音源

図 13 実測値と予測値 (距離考慮 式(8)) の比較

3.4 距離と物理指標の関係：詳細検討

アトリウムと地下ピットを対象に距離と物理評価指標の関係を更に詳細に検討する。

対象とするアトリウムの平面図と断面図を図 14, 15 に示す。概略寸法が 20m×24m×ch5m で一部吹抜けを有すアトリウム空間である。図に示すように単一指向性音源 (AIJ 音源スピーカ) を設置し、1m 間隔で測定を行った。測定風景を写真 2 に示す。

地下ピットは、免震ピットの展示施設の 1 スパン分 9m×6m×ch3.3m を対象とした。

STI の結果を図 16 に示す。アトリウム (△) は、距離が 5m 程度になると STI=0.55~0.6 で値が変化しなくなる。13m あたりで再び値が下がり STI=0.5 になる。13m あたりは、図 14 の断面図に示す様に上部が吹抜けになった影響と推測される。

地下ピット (○) は、4m で STI=0.5 で値が変化しない。

MTI500Hz の結果を図 17 に示す。STI より値は全体的に小さめで、距離と MTI の傾向は同じである。距離考慮の式 (8) に 500Hz の残響時間平均値と室容積と距離を用いて求めた MTI をプロットした。アトリウムは、距離が離れた部分で対応がよいことが確認できる。地下ピットは実測値が計算値より大きい。前節と同じく計算上 MTI 値が小さいとき (地下ピットは T=4.6sec) 実測値はそれほど小さくならない。予測式には改善の必要があることが示された。

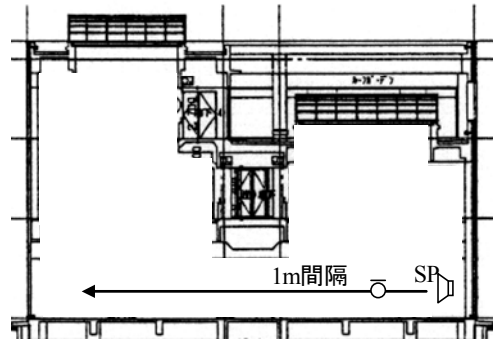


図 14 アトリウム断面図

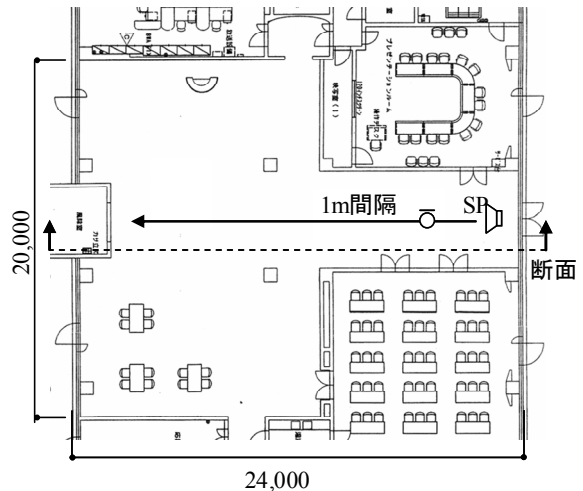


図 15 アトリウム平面図



写真 2 測定風景：アトリウム

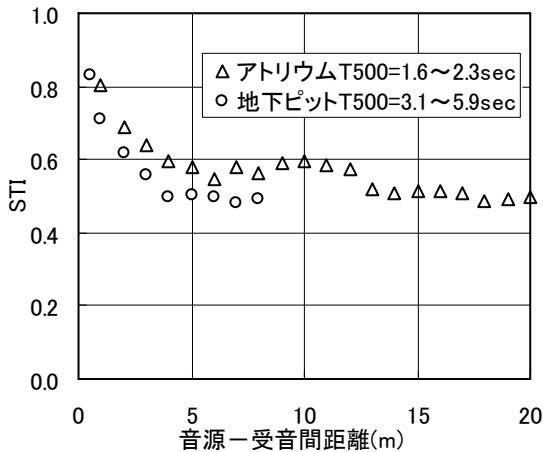


図 16 距離と STI の関係

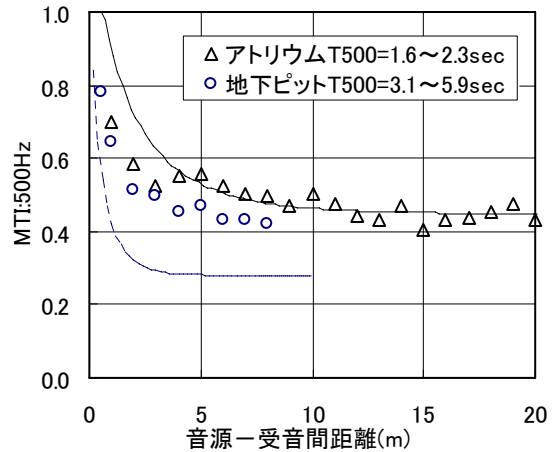


図 17 距離と MTI500Hz の関係

4. まとめ

実測の STI は 0.4 以下になりにくい傾向があった。拡散音場の予測式(7)より距離を考慮した式(8)を用いることで STI の予測精度は向上する。この式を使用することで、STI を予測できることが示唆された。

より正確に予測する場合は、音源指向性・反射面の位置・ノイズの考慮などを更に検討する必要がある。

【謝辞】

測定にご協力いただいた工事関係者、および本検討に議論いただいた日本建築学会音声伝送研究 WG 委員各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会：第 61 回音シンポジウム「室内音声伝送品質の設計・評価基準の確立に向けて」, 2007. 3
- 2) 小林好人, 佐藤洋：測定用のスピーカの提案とその使用方法について, 日本建築学会シンポジウム資料, pp. 9-11, 2003. 1
- 3) 西川嘉雄, 小林好人：インパルス応答データベースの分析と活用, 日本建築学会シンポジウム資料, pp. 17-24, 2005. 3
- 4) 西川嘉雄, 佐藤洋, 井上諭, 小林好人：建築空間におけるインパルス応答を用いた音声伝送性能評価-各種物理評価指標の関係-, 日本建築学会環境系論文集 No. 605, pp. 9-14, 2005. 7
- 5) T. Houtgast and H. J. M. Steeneken : The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility, *Acustica*.28, pp.66-73, 1973
- 6) T. Houtgast and H. J. M. Steeneken : A Multi-Language Evaluation of the RASTI-Method for Estimating Speech Intelligibility in Auditoria, *Acustica*.54, pp.185-199, 1984
- 7) M. R. Schroeder : Modulation transfer functions: Definition and measurement., *Acustica*. 49, pp. 179-182, 1981
- 8) 小椋靖夫, 浜田晴夫, 三浦種敏：音場における音声伝送品質のための MTF と STI について, 日本音響学会誌 40 巻 3 号, pp. 181-191, 1984. 3
- 9) T. Houtgast, H. J. M. Steeneken, R. Plomp : Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function, *General room acoustics.*, *Acustica* 46, pp. 60-72, 1980