

音源の特性を考慮した室形状評価に関する研究*

—室内楽を対象にした検討例—

松尾昌美(九州大学大学院)

1. はじめに

コンサートホール音場の主観的評価において、例えば、“客席中央付近は、ピアノソロの音量感に乏しい”、“弦楽オーケストラに対し、2階席は非常に澄んだ音がする”或いは、“後方座席では、金管の音が耳に付く”というように、音源の種類・位置や聴衆エリアの設定という視点が重要な意味を持つ。しかしながら、設計時における予測や測定の評価は、ほとんどの場合舞台上の代表点に設置した無指向性音源を用いて行われており、実際の演奏会における聴感印象との対応についても明らかにされていない。

このような観点から本研究は、音源の性質を考慮に入れ、より実際の条件に対応した室内音場の評価法を模索するものである。

これまでの研究¹⁾²⁾において、音源(楽器や音声)の性質を指向性の鋭さ・向き・舞台上の位置の3点からモデル化して得られる物理指標の値と従来の無指向性音源を仮定して求められる値との差について、幾何音響シミュレーションを用いて検討した。その結果、音響設計における評価量として一般的に使用される C_{80} や LE 等の値に聴感上有意な差が生じること、弦楽器のように比較的指向性の鋭い音源を対象とする場合、想定する指向性の違いが最適形状の決定を大きく左右する可能性のあることを示した。

引き続き本稿では、ケーススタディとして小編成の室内楽を対象にしたコンサートホールを取り上げ、音源の指向性と音場の評価との関連についてさらに考察を加えるとともに、従来の無指向性音源に替わる室内楽用の標準音源について検討したので、以下に報告する。

2. シミュレーションの概要

2.1 解析方法

解析は、Cone Beam Method³⁾(放射音線数:42527本、音線の追跡打ち切り時間:300ms、反射次数:8次)を用いて得られたインパルス応答から、 C_{80} (音楽に対する明瞭性)、 EDT (残響感)並びに LE (拡がり感)という3つの代表的な室内音響指標を算出した。

2.2 室形状モデル

室形状は、収容人員800人規模のオーデトリウムを想定し、横幅の広いモデル(Aタイプ)からいわゆるシューボックスと呼ばれる縦長のモデル(Dタイプ)に至るまで計6種類の平面形を対象とした。天井の高さ(15.5m)と床面積は一定である。観測点は、2m×2mの格子点として場内一様に設けた。室境界面は、一般的なコンサートホールの内装仕様とし、客席床と客席後壁の一部を吸音性、その他の内装面をすべて反射性とした。形状モデルおよび音響諸元をFig.1とTable 1に示す。

2.3 音源モデル

音源は、弦楽四重奏(第1ヴァイオリン、第2ヴァイオリン、ビオラ、チェロ:各々の略号1Vn,2Vn,Va,Vc)を想定し、既知の指向性データ⁴⁾をもとに θ_{3dB} によつ

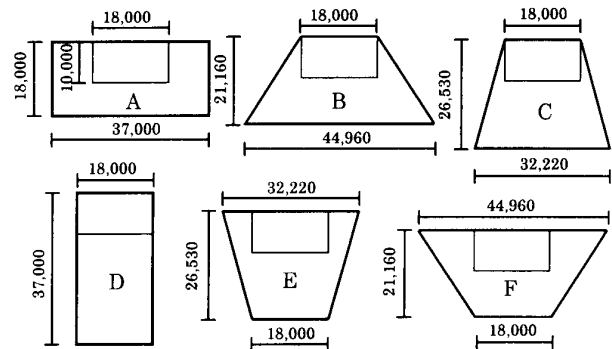


Fig.1 Model plans for computer simulation.

Table 1 Outline of models.

| Plan type | V(m ³) | S ₀ (m ²)*1 | V/S(m) | RT ₆₀ *2 | $\bar{\alpha}$ *2 | N*3 |
|-----------|--------------------|------------------------------------|--------|---------------------|-------------------|-----------|
| A | 10,143 | 486.0 | 3.3 | 2.04 | 0.22 | 94 (144) |
| B | | | 3.3 | 1.96 | 0.22 | 110 (160) |
| C | | | 3.4 | 2.07 | 0.22 | 116 (166) |
| D | | | 3.4 | 2.05 | 0.22 | 104 (144) |
| E | | | 3.4 | 2.11 | 0.22 | 110 (160) |
| F | | | 3.3 | 2.03 | 0.22 | 104 (154) |

*1 the floor area of audience

*2 averaged over the four octave bands from 250 to 2k Hz

*3 the number of receiving points in the seating area (including those on stage)

Table 2 Conditions of modeled musical instruments for strings quartet.

| Musical Instruments | Location | Power level (dB) | | | θ_{3dB} (°) | | | Orientation | |
|---------------------|----------|------------------|------|--------|--------------------|------|--------|-------------|--------------|
| | | 1k | 2k | 4k(Hz) | 1k | 2k | 4k(Hz) | ϕ (°) | δ (°) |
| Omni. | L0 | 90.0 | 90.0 | 90.0 | — | — | — | — | — |
| 1Vn | L1 | 85.0 | 85.0 | 76.5 | 11.0 | 14.5 | 11.0 | 86.0 | 75.0 |
| 2Vn | L2 | 85.0 | 85.0 | 76.5 | 11.0 | 14.5 | 11.0 | 62.0 | 75.0 |
| Va | L3 | 85.0 | 85.0 | 76.5 | 11.0 | 14.5 | 11.0 | -14.5 | 75.0 |
| Vc | L4 | 76.0 | 72.0 | 61.0 | 11.0 | 14.5 | 11.0 | 27.0 | 25.0 |
| Q ₀ | L0 | 90.0 | 90.0 | 90.0 | 11.0 | 14.5 | 11.0 | ϕ q | δ q |

*A study on the effect of directional characteristics of sound source on acoustical design by means of computer simulation, A case study for chamber music by Masami Matsuo (Graduate School, Kyushu Univ.)

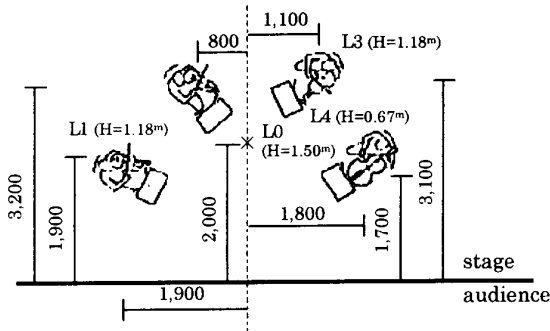


Fig.2 Location of sound sources on stage.

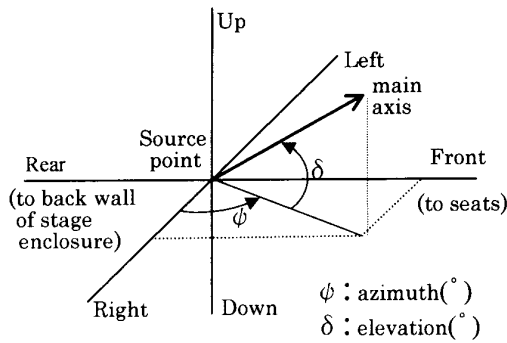


Fig.3 Definition of orientation of main axis in the directivity pattern.

て定義される単一指向性音源としてモデル化した (θ_{3dB} : 音の強さが最大値に対して 3dB 低下する指向軸からの角度($^{\circ}$)). 舞台上の位置については、Fig.2 に示すように通常の演奏形態を考慮し、また指向軸の向きについては水平角 ϕ ($^{\circ}$) と仰角 δ ($^{\circ}$) により定義した (Fig.3)。各音源モデルの条件を Table 2 に示す。また、比較のための音源モデルとして無指向性音源(略号: Omni.)を代表点(舞台上中央)に設定した。

次に、多数の音源を対象とした音場の予測を行う際にも、従来から用いられている無指向性音源のように舞台上の代表点に設定された単一の音源によって解析・評価が行えることが実用上望ましい。そこで本稿では、音源(指向パターンは V_n)の指向軸を $0^{\circ} \leq \phi_q \leq 180^{\circ}, 0^{\circ} \leq \delta_q \leq 90^{\circ}$ の範囲で 15° ずつ変化させた計 91 種類の音源を用いて同様の解析を行い、その結果から弦楽四重奏に対応した室内楽用標準音源のモデル化の可能性について検討した。

3. 解析結果と考察

3.1 弦楽四重奏を対象とした解析

弦楽四重奏の 4 つの音源について解析した結果を無指向性音源の場合と対比させて Fig.4 に示す。ただし、値は客席内平均値(250-2kHz)と標準偏差(σ)を表し、形状 A: 幅広型と形状 D: 縦長型についてのみ示している(他は略)。また、図中の破線は設計上の目安となる各物理指標の許容範囲⁵⁾を、 p は許容範囲を満足する観測点数の割合(%)を示す。

まず C_{80} について見てみる。4 音源を用いた場

合、形状 A では各音源ともほぼ一様に $-2dB$ をクリアしているものの場内のばらつきは比較的大きい。それに対して、形状 D では、音源により差があり V_a 以外は $-2dB$ を下まわっているが、逆にばらつきは小さい。一方、無指向性音源を用いた場合は、形状 A で $-0.9dB$ ($\sigma=0.9$)、形状 D で $-1.1dB$ ($\sigma=1.3$) と両者の差はほとんど認められず、 σ はむしろ形状 A の方が小さい。このことは、4 音源を用いた場合に比べて幅広型の形状と縦長型の形状の音響的な質の差が抽出されにくいことを示している。すなわち、音源・観測点間の平均距離が短いために直接音エネルギーが相対的に増加し場所によるばらつきも大きくなるといった幅広型形状の持つ一般的な傾向が、無指向性音源を仮定した解析では認められない。

EDT については、形状 A で音源による差が小さいのに対して形状 D では特に $1V_n$ の値が許容範囲を超えて大きい値を示している。これは、縦長型形状の場合、客席後方部において後期反射音の密度が増加することに起因していると考えられる。しかしながら、無指向性音源を用いた結果では、形状 A: 2.76s、形状 D: 2.86s と両者の差は小さく、当然のことながら音源の違いによる影響を見ることはできない。

次に LE について見てみる。4 音源を用いた場合、形状 A では各音源とも 15% を下まわり拡がり感を確保するという観点からは通常いわれているようにあまり好ましくない形状であることが分かる。形状 D では V_a を除き 15% 以上の値となっており、側方反射音が豊富であるという縦長型形状の特徴が現れている。一方、無指向性音源を用いた場合は、形状 A: 20.3% ($\sigma=8.1$)、形状 D: 22.9% ($\sigma=4.5$) と形状 D の方が若干大きくはなっているもののその差は小さい。すなわち、幅広型の形状 A でも 'Good' と評価される 20% を越える値となっており、また、4 音源による p が平均 23.4% であるのに対して無指向性音源では 80.9% とその差はあまりにも大きい。

以上のことは、無指向性音源だけによる予測では、個々の音源の持つ特性(特に指向軸の向き)が反映されないために、実際の感覚からも大きく異なった評価をしてしまう可能性があり、危険側の設計すなわち過大評価につながる恐れがあることを示唆している。

3.2 室内楽用標準音源

4 つの音源並びに指向軸を 15° ずつ変化させた計 91 種類の音源(位置は舞台中央)に対する解析結果を比較検討し、4 音源を代表させることのできる室内楽用標準音源について考察する。

標準音源の指向軸を変化させた場合の算出結果の一例($\phi_q=90^{\circ}, 0^{\circ} \leq \delta_q \leq 90^{\circ}$, 形状 A, C, 他は略)を、4 音源(Qt.)および無指向性音源(Omni.)の場合と比較して Fig.5 に示す。ここで、図中の●は 4 音源との差が危険率 5% で有意であることを、○は有意で

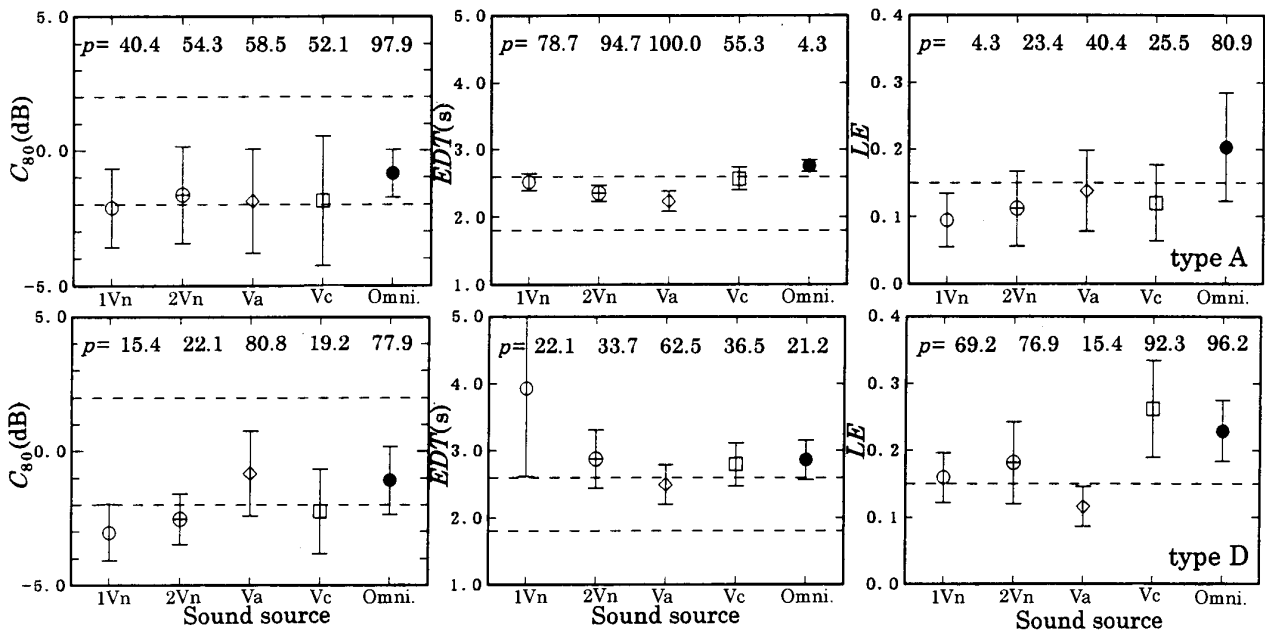


Fig. 4 Acoustical quantities calculated by using the modeled musical instruments of strings quartet in room type A and D. Mean value and the standard deviation averaged over the observing points (from 250 to 2k Hz); ----, the maximum and minimum acceptable values of each index.

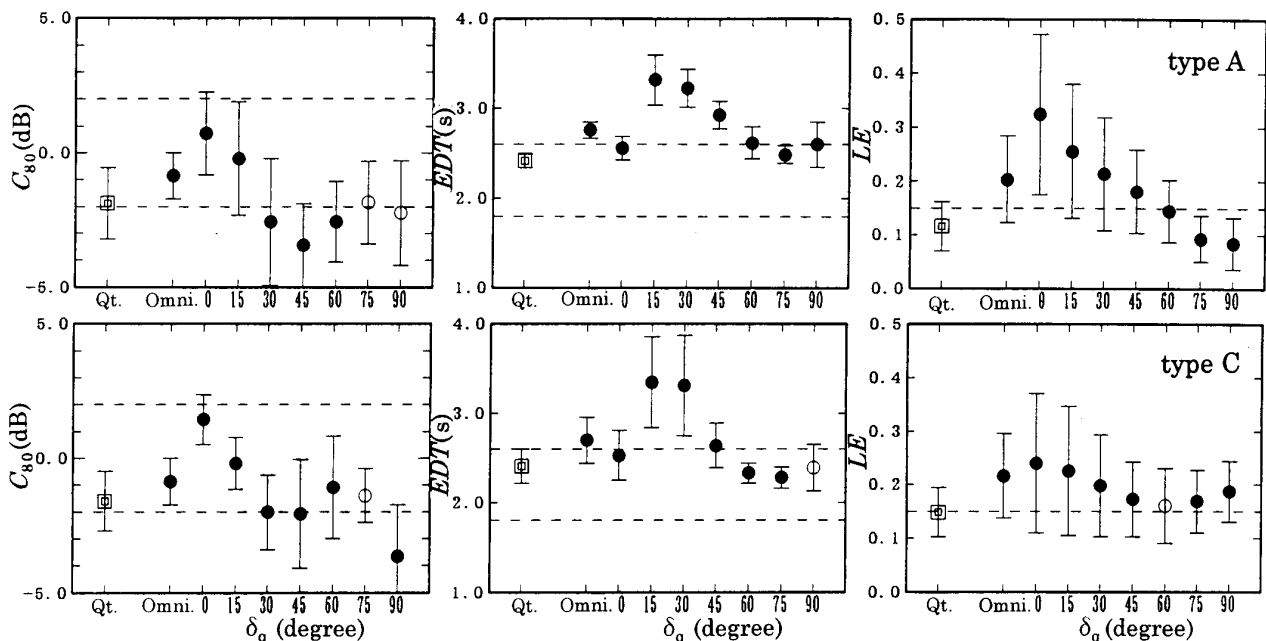


Fig. 5 Comparison between the acoustical quantities calculated with strings quartet(Qt.) and with the various orientations of main axis in directionality on the stage center in room type A and C, when ϕ_q is 90° . Mean value and the standard deviation averaged over the observing points (from 250 to 2k Hz); ●, the difference in significance level of below 5%; ○, not significant.

ないことを各々表しており、これより両者の差はほとんどの場合有意であると判断される。

これらの結果から、各物理指標の絶対値並びに空間分布特性が4音源によるそれと等価であると見なせる音源の指向軸を決定するために、各観測点における両者の値の差の平均値(\bar{D})並びに偏差(σ_D)を算出した。結果を Fig.6($\phi_q=60^\circ$ の場合)に示す。 $|\bar{D}|$, σ_D とも、室形状の違いによる傾向の差はほとんど認められない。 $|\bar{D}|$ については、いずれの ϕ_q においても δ_q が増加するにつれて全体的に値は小さくなっており、その最小値は $\phi_q=60^\circ$, $\delta_q=75^\circ$ の時に C_{80} で0.16dB (1.55), EDT で0.10s (0.15),

LE で0.5%(4.0)である(括弧内は σ_D)。すなわち、この $\phi_q=60^\circ$, $\delta_q=75^\circ$ の場合を弦楽四重奏に関する標準音源として考え従来の無指向性音源に置き換えることにより、実際のコンサート音場に対応した評価を行うことができる。ちなみに、 $\delta_q=75^\circ$ は1Vn, 2Vn, Vaに等しい。標準音源を用いて得られた空間分布特性の一例(LE)を、4音源および無指向性音源の場合と比較して Fig.7に示す。

4. むすび

実際の演奏会等で用いられる楽器の性質を、指向性の鋭さと向き及び設置位置の空間的な拡がり

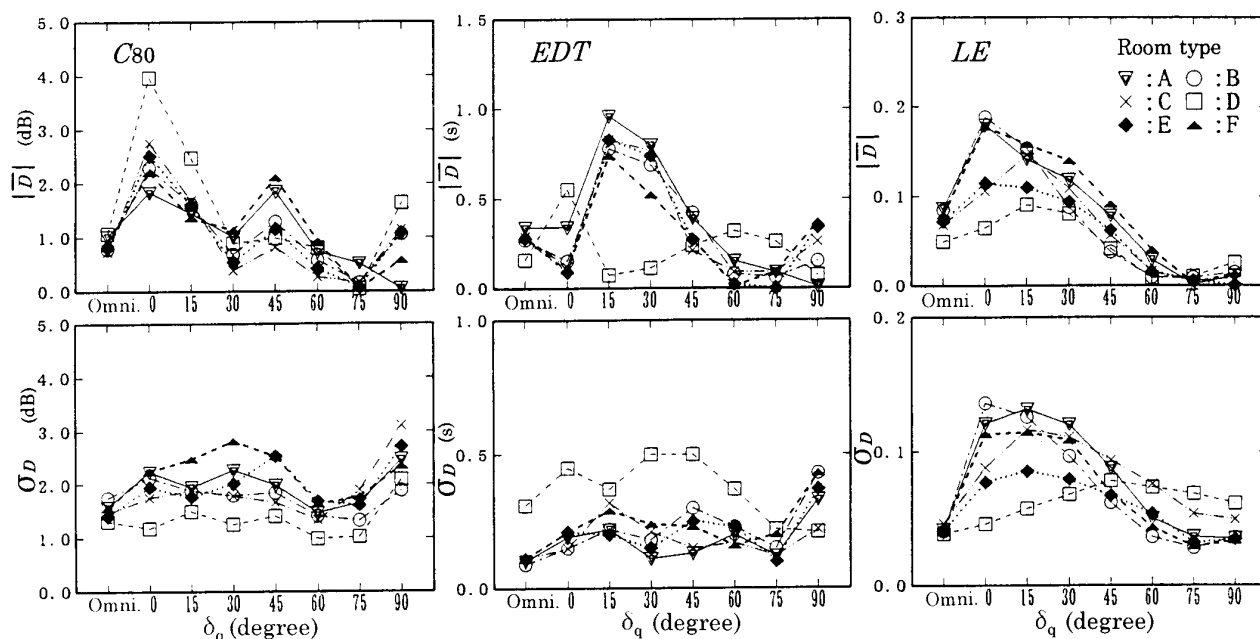


Fig. 6 Mean value and the standard deviation of the difference between the values calculated with strings quartet(Qt.) and with the various orientations of main axis in directionality on the stage center when ψ_q is 60° .

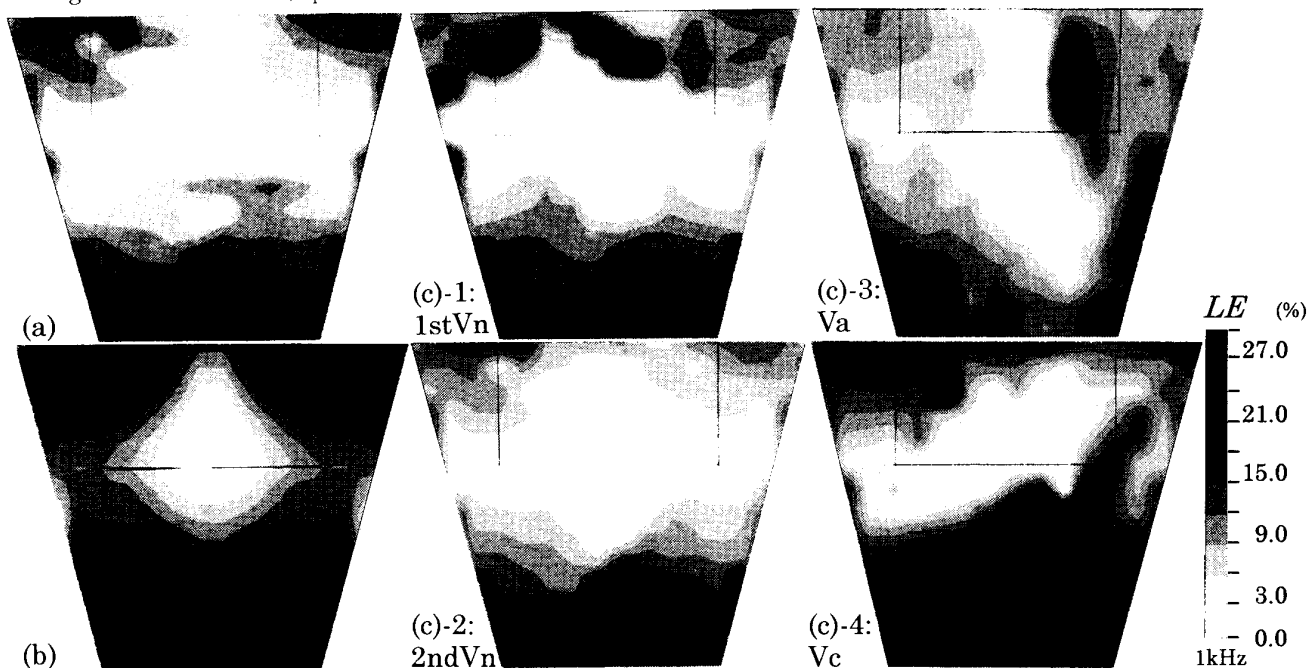


Fig. 7 Spatial distribution of LE at 1k Hz in room type E when (a) a standard source for strings quartet ($\psi_q=60^\circ$, $\delta_q=75^\circ$), (b) omni-directional source and (c) each source of strings quartet are used.

という点からモデル化することによって、従来の無指向性音源により求められる室内音響指標の値と、音源の性質を包含させた場合の値との違いをコンピュータシミュレーションを用い示し、無指向性音源に替わる標準音源を検討した。

音響設計という立場からすると、予測は実測の上になり立つものである。今後は、実測に対応できる音源のモデル化や聴感との関連について検討していく必要があると考える。

謝辞

御指導戴きました九州共立大学古屋浩先生に対して深い

謝意を表します。

参考文献

- 1) 古屋浩:室内音場評価における音源の指向性の影響(その1),日本建築学会大会学術講演梗概集(1996.9)
- 2) 古屋浩:室内音場評価における音源の指向性の影響(その2),日本建築学会大会学術講演梗概集(1997.9)
- 3) E.De Geest and C.F.McCulloch: Numerical Modeling in Geometrical Acoustics using the Conical Beam Method with Applications in Architecture, Industry and the Environment, Proc. of EURO-NOISE 92, Vol.3(1992)
- 4) H.F.Olson,音楽工学,誠文堂新光社(1969)(平岡正徳訳)
- 5) V.L.Jordan, Acoustical Design of Concert Halls and Theatres, Applied Science Pub.(1980)