

# 反射音到来方向を考慮したステージ音響評価に関する研究 その1 -方向別STの計測方法- \*

☆板垣大稀（東大・工），橋本悌（ヤマハ），佐久間哲哉（東大・工）

## 1 はじめに

筆者らは、反射音の到来方向を考慮した舞台音場評価のため、方向別インパルス応答計測に基づく ST の測定手法を構築した<sup>[1]</sup>。しかし、ISO 3382-1<sup>[2]</sup>に規格化される ST には測定位置と時間窓に関する不整合が見られるほか、既往研究において ST を求める上での基準エネルギーの再現性に関する問題点も指摘されている<sup>[3]</sup>。本研究では、二種類のスピーカーを用いた測定システムにおいて ST の基準エネルギーの再現性と ST の評価区間の妥当性について検討して、方向別 ST の測定システムの検証を行う。

## 2 ST の測定方法

### 2.1 ST の定義

ISO 3382-1 において、ステージ音響指標 ST が次式で規定されている。

$$ST_{\text{Early}} = 10 \log_{10} \frac{\int_{\frac{10}{\text{ms}}}^{\frac{100}{\text{ms}}} p(t)^2 dt}{\int_0^{\frac{10}{\text{ms}}} p(t)^2 dt} \text{ (dB)} \quad (1)$$

$$ST_{\text{Late}} = 10 \log_{10} \frac{\int_{\frac{100}{\text{ms}}}^{\frac{1000}{\text{ms}}} p(t)^2 dt}{\int_0^{\frac{10}{\text{ms}}} p(t)^2 dt} \text{ (dB)} \quad (2)$$

ここで、 $p(t)$  は全指向性マイクで収録したインパルス応答を表す。解析周波数は 250～2000 Hz (1/1 oct.) の 4 帯域であり、各周波数について上式に従い計算した値を算術平均して算出する。スピーカー及びマイクの位置は、床からの高さを 1 m または 1.5 m、壁面からの距離を 2 m 以上とし、マイクはスピーカーから距離 1 m 離して舞台後方に付置する。

### 2.2 計測システム

Fig. 1 に用いた機材を示す。マイクロホンとして、一次アンビソニックスマイク (Ambeo VR Mic、Sennheiser) を用いた。全指向性マイクおよび直交六方向に向けたカージオイドマイクのインパルス応答は、A フォーマットの

インパルス応答を B フォーマットに変換したのち、Eq. (3)～(8) の通りに算出した。

$$p_{\text{Front}}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) + p_{\text{FB}}(t)) \quad (3)$$

$$p_{\text{Back}}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) - p_{\text{FB}}(t)) \quad (4)$$

$$p_{\text{Left}}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) + p_{\text{LR}}(t)) \quad (5)$$

$$p_{\text{Right}}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) - p_{\text{LR}}(t)) \quad (6)$$

$$p_{\text{Up}}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) + p_{\text{UD}}(t)) \quad (7)$$

$$p_{\text{Down}}(t) = \frac{1}{2} \times (p(t) - p_{\text{UD}}(t)) \quad (8)$$

ただし、 $p_{\text{dir}}$  ( $\text{dir} = \text{Front, Back, Left, Right, Up, Down}$ ) は前後左右上下に向けたカージオイドマイクで収録したインパルス応答と等価な信号であり、 $p_{\text{FB}}$ 、 $p_{\text{LR}}$ 、 $p_{\text{UD}}$  は前後、左右、上下の双指向性マイクで収録したインパルス応答と等価な信号である。

また、音源系として全指向性の対向型スピーカーと小型十二面体スピーカーの二種類のスピーカーを用い、音源にはスイープサイン信号を用いた。両方のスピーカーで 4000 Hz 帯域では指向性の偏りが見られたが、ST の分析に用いる 250～2000 Hz の帯域では方向による出力の偏りは 0.5 dB 以下であり、およそ全指向性となっていることを確認した。



Fig. 1: Two types of loudspeakers (left: small dodecahedron, middle: opposed-type) and ambisonic microphone (right).

\*Stage acoustic evaluation considering arrival direction of reflection sound, Part 1 - Measurement method of directional ST, by ITAGAKI, Daiki (Univ. of Tokyo), HASHIMOTO, Dai (Yamaha Corp.) and SAKUMA, Tetsuya (Univ. of Tokyo)

## 2.3 測定対象

座席数約 1500 席の中ホール of 舞台において、インパルス応答を測定した。舞台の諸元を Table 1 に示す。測定点は上手側半面に 2 m グリッドで配置し、ISO に準じて壁面から 2 m 程度距離を取ることができる 15 点とした。舞台平面図および測定位置を Fig. 2 に示す。スピーカー及びマイクは床から 1.5 m の高さに設置した。

Table 1: Details of Hall A.

座席数 (席)	室容積 (m <sup>3</sup> )	表面積 (m <sup>2</sup> )	舞台 間口 (m)	舞台 奥行 (m)	舞台 高さ (m)
1514	15580	5860	18.2	18.2	15

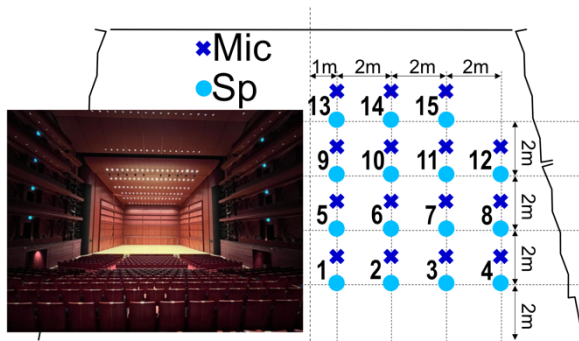


Fig. 2: Measurement points for Hall A.

## 3 基準エネルギーの再現性の検討

二つのスピーカーを用いて測定したインパルス応答波形の 0~10 ms の区間を Fig. 3 に例示する。信号処理にあたっては、ピークの音圧から 30 dB 下がる時刻を直接音到来時刻と見なして時間窓をかけた。また、バンドパスフィルタによる周波数帯域のフィルタリングは、時間窓をかけたのちに行った。

小型十二面体スピーカーおよび対向型スピーカーのインパルス応答から計算した ST の基準エネルギーの平均値を Fig. 4 に示す。小型十二面体の周波数特性は比較的平坦なのに対して、対向型では 250 Hz 帯域の出力がかなり小さい。ただ、両スピーカーとも基準エネルギーの標準偏差は 0.1 dB 以下であり、測定の再現性は十分高いことが確認された。

## 4 初期反射音エネルギーに関する検討

### 4.1 測定システムに関する検討

二種類のスピーカーで測定したインパルス応答について、ISO に準拠し、初期反射音の時間窓を 20~100 ms として  $ST_{Early}$  を計測した。各帯域及び 4 帯域平均の結果を Fig. 5 に

示す。

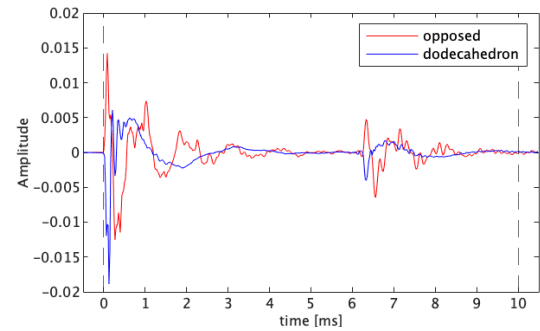


Fig. 3: Example of IR (No.6)

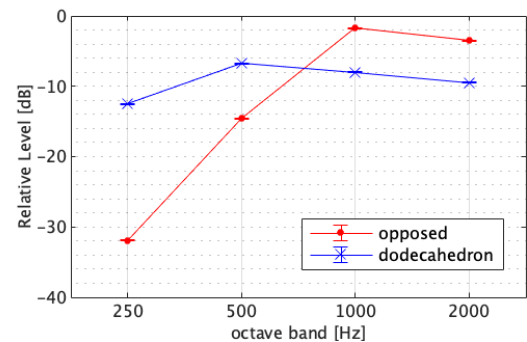


Fig. 4: Mean level and standard deviation of direct sound energy including floor reflection.

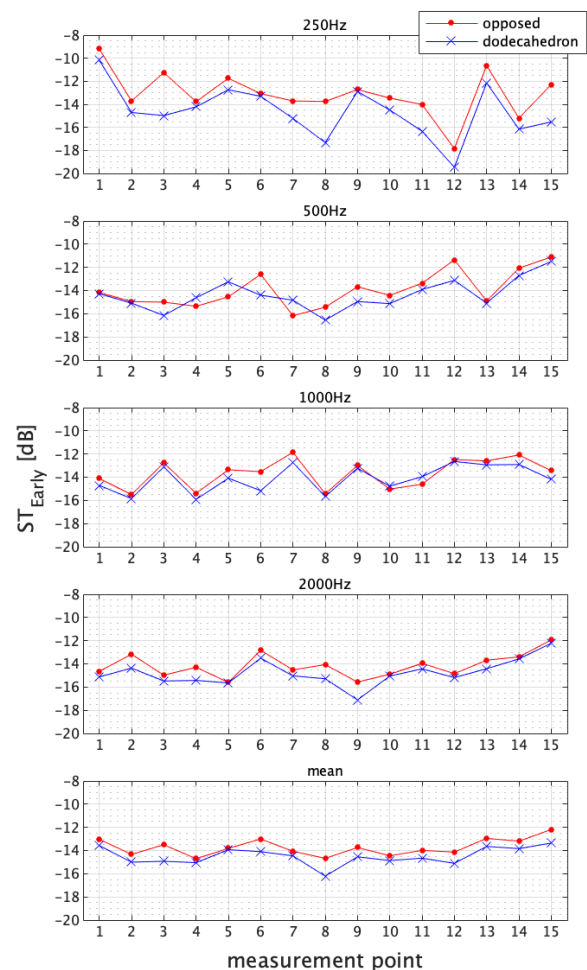


Fig. 5:  $ST_{Early}$  measured with two loudspeakers.

250 Hz 帯域では、対向型の方が全体的に値が高く、最大 3 dB 程度の差があった。この帯域では対向型の出力が小さいため、SN の影響の可能性が考えられる。

#### 4.2 評価区間に関する検討

対向型スピーカーを用いたインパルス応答を用い、初期反射音の評価区間について検討する。ISO では初期反射音の評価区間を 20～100 ms と定めるとともに、測定点を壁面から 2 m 以上離すこととしているが、壁面から 2 m の測定点では壁から一次反射音が 20 ms 以内に到達する可能性がある。壁面から遠い測定点 1、近い測定点 4 におけるインパルス応答の 0～20 ms の区間を Fig. 6 に例示する。測定点 4 では 16 ms に反射音が到来することがわかる。

初期反射音の評価区間の開始時刻を 10 ms 及び 20 ms とした場合の  $ST_{Early}$  を Fig. 7 に示す。開始時間 10 ms の場合、舞台上手側の測定点 4, 8, 12 では最大 3 dB 程度の顕著な上昇が見られる。

#### 4.3 方向別 ST の検討

既報<sup>[1]</sup>にて方向別 ST を Eq. (9), (10) の通り提案し、特に  $ST_{Early,dir}$  が方向性を持つことを示した。

$$ST_{Early,dir} = 10 \lg \left( \frac{\int_{10ms}^{100ms} p_{dir}^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt} \right) \quad (9)$$

$$ST_{Late,dir} = 10 \lg \left( \frac{\int_{100ms}^{1000ms} p_{dir}^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt} \right) \quad (10)$$

初期反射音の評価区間の開始時刻を 10 ms 及び 20 ms とした場合における測定点 1, 4, 8, 12 における水平面内の  $ST_{Early,dir}$  を Fig. 8 に示す。壁面から遠い測定点 1 では時間窓によらず同じ値となった。これは他の測定点でも同様であった。舞台上手側の測定点 4, 8, 12 では、 $ST_{Early,Left}$  が開始時刻 10 ms の場合の方が 20 ms の場合よりも 4 dB 程度大きいことが確認できる。

10～20 ms の間に到来する初期反射音も演奏者に対して直接音のラウドネスを増強し、空間印象にも大きく影響すると予想されるため、方向別 ST において初期反射音の評価区間は 10～100 ms とした方が妥当であると考えられる。

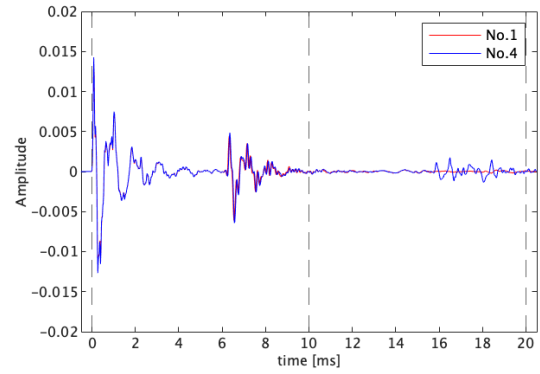


Fig.6: Example of IR measured at two points (No. 1, 4)

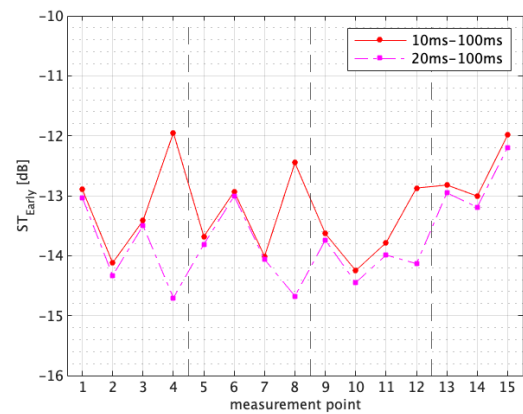


Fig.7:  $ST_{Early}$  measured with two time intervals for early reflection energy.

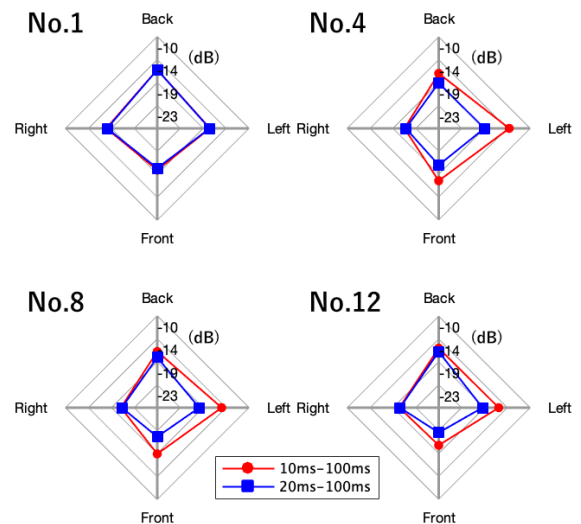


Fig. 8:  $ST_{Early,dir}$  measured with two time intervals for early reflection energy (No. 1, 4, 8, 12).

## 5 床段差の影響に関する検討

現実の演奏環境では、ひな壇が用いられることが少なくない。舞台条件においては、床からの反射により ST の基準エネルギーにばらつきが生じると考えられる。スピーカーおよびマイクを床から 1.5 m の高さとする測定条件では、幾何学的条件より、床からの反射音は直接音よりも約 6 ms 遅れて到来する。ST の基準エネルギーの時間窓を直接音到来から 6 ms 間とすれば、床条件が異なる場合でも、直接音のみを切り出すことにより ST の適用条件を広げて評価できる可能性がある。そこで、Fig.9 に示すホールにおいて、対向型スピーカーを用い、ひな壇を上げる場合と上げない場合の二つの床条件についてインパルス応答測定をして分析を行なった。ひな壇の一段当たりの高さは 17 cm であり、マイクとスピーカーが異なる段に乗る場合はスピーカーの高さを 1.5 m としマイクはスピーカーの正面に来るように高さを調整した。直接音到来から 6 ms 間と 10 ms 間の二条件についてエネルギーの標準偏差を求めた(Fig.11)。10 ms 間では 6 ms 間に比べ標準偏差が大きく、特に低音域で顕著であった。

## 6 おわりに

ST の測定システムおよび評価区間について考察し、方向別 ST の計測方法を検証した。また、直接音のみを基準エネルギーとすることで、ST をステージの評価から演奏者の評価へ拡張できる可能性を示した。その 2 では、方向別 ST をさまざまなホールで計測し、その結果を考察する。

### 参考文献

- [1] 板垣他, AIJ 大会梗概集 (環境工学 1), 2022.
- [2] ISO 3382-1: 2009, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces
- [3] 上野他, AIJ 大会梗概集 (環境工学 1), 1998.

Table 2. Details of Hall B

座席数 (席)	室容積 (m <sup>3</sup> )	表面積 (m <sup>2</sup> )	舞台 間口 (m)	舞台 奥行 (m)	舞台 高さ (m)
1884	18610	6445	20.8	11.7	-

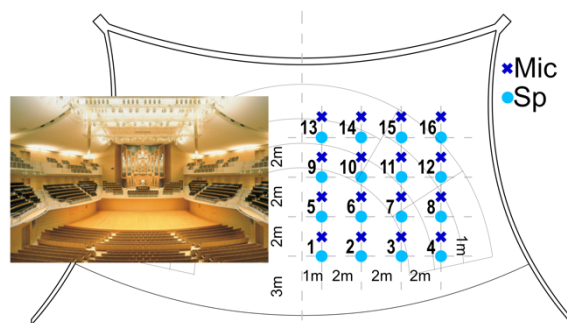


Fig. 9: Measurement points for Hall B

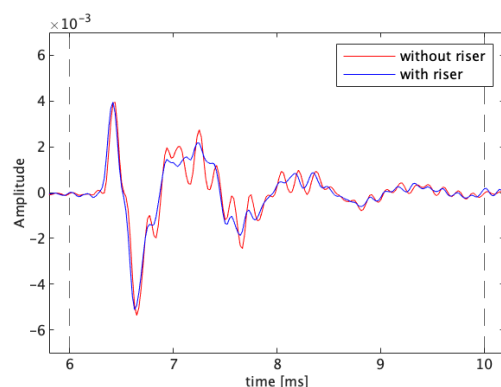


Fig. 10: Example of IR without and with stage riser (No. 14).

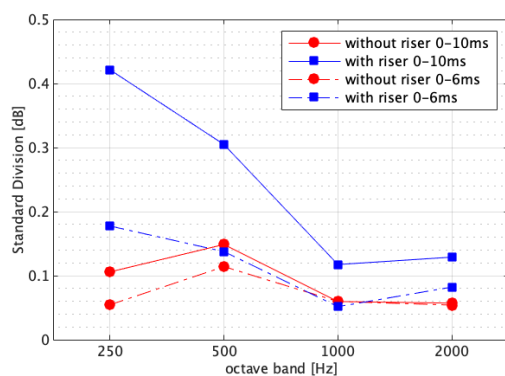


Fig.11 standard deviation of direct energy