九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

既存ホールにおける音に包まれた感じに関する考察

和久田，晃子
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

古屋，浩
九州共立大学

藤本，一壽
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

https://doi.org/10.15017/19069

出版情報：都市・建築学研究. 8, pp.129-134, 2005-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第8号，2005年7月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.8, pp. 129～134, July. 2005

既存ホールにおける音に包まれた感じに関する考察

On predicted measure of listener envelopment in existing halls

和久田晃子*，古屋　浩**，藤本一壽*
Akiko WAKUDA, Hiroshi FURUYA and Kazutoshi FUJIMOTO

The purpose of this study is to propose a new method for evaluating the sound field of auditoria with incorporation of the measure for listener envelopment (LEV). In this paper, the strength of LEV is calculated in existing halls based on the previous results of objective measurements and psychological experiments, and the relation between LEV and the characteristics of late arriving sounds (C_{80} and directional late energy ratios) is examined. The result shows that significant differences in perceptions of LEV are found in the different seats and its range differs according to the objective properties of the halls. This confirms that the consideration of LEV is important for the evaluation of sound fields.

Keywords *: Evaluation of Sound Field, Listener Envelopment, Directional Late Energy Ratio, Ratio of Early-to-late Sound Energy, Simulation Calculation*
音場評価，音に包まれた感じ，方向別後期音エネルギ率，初期音／後期音エネルギ比，シミュレーション計算

1. はじめに

コンサートホール音場を評価する重要な心理的要因である“空間印象”(Spatial impression) は，「見かけの音源の幅」(ASW) と「音に包まれた感じ」(LEV) の少なくとも2つの異なる要素感覚に分けて考えられるとされている[1]．このうち，LEV については後期音と関連していることが知られているが，LEV と後期音の詳細な物理特性との関係は明らかではない．

本研究の目的は，LEV を考慮したホール音場の評価手法を提案することである．筆者らはこれまでに，後期音と LEV の関係を明らかにするために一連の音響心理実験を行い，側方以外から到来する後期音も LEV に寄与すること[2]，LEV は初期音／後期音エネルギ比 C_{80} および側方，上方，後方からの方向別後期音エネルギ率 DLR(Directional late energy ratio) によって説明できることを明らかにしてきた[3)4)]．

このような知見に基づいて LEV を考慮した音場評価手法を確立するためには，実際のホール空間において LEV がどのように知覚されるか，すなわち，ホールによって LEV の知覚にどのような違いが生じるのか，同じホール内で客席によって LEV の知覚に有意な差が認められるのか，などを明らかにしておく必要がある．そこで本報告では，既存ホールにおける実測調査[5]から得た方向別後期音の物理量を用いて客席における LEV を推定することにより，客席およびホールごとの LEV の特徴について考察し，コンサートホール音場の評価において LEV を考慮することの重要性を示す．

2. 既存ホールにおける LEV 尺度値の推定

2.1 対象ホール

対象ホールは **Table 1** に諸元を示す5ホールである．客席数は 1,522～1,871 席であり，Hall A，C は2階席を有する多目的ホール，Hall B はワンフロアの扇形ホールで

*　都市・建築学部門
**　九州共立大学

Table 1 Acoustical outline of target halls.

Hall	Seats	V(m^3)	V/S(m)	RT*(s)	$\bar{\alpha}$*
A	1,522	12,167	2.60	1.59	0.23
B	1,780	13,994	3.36	1.45	0.31
C	1,811	18,700	3.02	2.20	0.20
D	1,871	17,445	2.51	2.24	0.17
E	1,813	19,410	3.03	2.07	0.21

* Average over five octave-bands of 250～4kHz.

5ホール中では最もデッドである．Hall D，Eはコンサートホールであり，そのうちHall Dは2，3階席にサイドバルコニー席を持つシューボックスタイプで主にクラシック演奏に用いられる．これらの5ホールについては，実測調査によって客席におけるC_{80}および方向別後期音エネルギ率DLRが得られている．

2.2 LEV尺度値の推定

実測調査で得たC_{80}およびDLRを，これまでの音響心理実験から得られている後期音の方向特性とLEVの関係に適用して，ホールの各測定点におけるLEV尺度値を推定する．LEVの推定には，C_{80}およびDLRとLEV尺度値の関係を与える(1)式を用いる．この式で推定されるLEV尺度値を$\mathrm{LEV_p}$(Predicted LEV)と表記する．

$$\begin{aligned}\mathrm{LEV_p} &= -2.263 - 0.265C_{80} \\ &+ 2.610LE_{\mathrm{late}} + 0.864VE_{\mathrm{late}} + 1.580BE_{\mathrm{late}}\end{aligned} \tag{1}$$

ここで，LE_{late}，VE_{late}，BE_{late}はそれぞれ全後期音エネルギに対する側方，上方，後方の各方向成分の割合を表し，(2)式によって定義される．ここで，$p_L^2(t)$および$p_V^2(t)$は双指向性マイクロフォンの，$p_B^2(t)$は単一指向性マイクロフォンの出力音圧値を示す．

$$\begin{aligned}LE_{\mathrm{late}} &= \int_{80}^{\infty} p_L^2(t)dt \Big/ \int_{80}^{\infty} p^2(t)dt \\ VE_{\mathrm{late}} &= \int_{80}^{\infty} p_V^2(t)dt \Big/ \int_{80}^{\infty} p^2(t)dt \\ BE_{\mathrm{late}} &= \int_{80}^{\infty} p_B^2(t)dt \Big/ \int_{80}^{\infty} p^2(t)dt\end{aligned} \tag{2}$$

(1)式はC_{80}とDLRを様々に変化させた刺激音場の一対比較実験[4]の結果からThurstone Case V[6]に基づいて構成したLEVの心理的間隔尺度を刺激の物理量で回帰させたものである．したがって$\mathrm{LEV_p}$に0.68以上の差がある場合にLEVの大きさの知覚に有意差があると判断される．

3. 考察

3.1 後期音特性と$\mathrm{LEV_p}$の関係

推定されたLEV尺度値について，ホールごとに考察する．

まず，Hall Aについて，各測定点における物理量(C_{80}および方向別後期音エネルギ率DLR)の実測結果(いずれもO.A.値)を**Fig. 1**に，測定点ごとの$\mathrm{LEV_p}$およびホールの平面図，断面図を**Fig. 2**に示す．ここで，$\mathrm{LEV_p}$はホールごとの平均値が0になるようにした．**Fig. 2**のグラフ中の破線は0を中心とする0.68の範囲を示しており，以下すべてのホールについて同様である．

Hall Aでは，バルコニー下の測定点No.5，6において$\mathrm{LEV_p}$が小さく，それ以外の測定点と比較するとLEVの知覚に有意差が生じていると推定される．**Fig. 1**から，測定点No.5，6ではC_{80}が顕著に大きいことがわかるが，これはバルコニー下の客席に到達する後期音エネルギが減少するためであると考えられる．また，DLRについては上方成分VE_{late}が特に低下しており，このことがLEVが低下する要因になっていると考えられる．一般にバルコニー下の客席は反射音が十分に到達しないことから音響的に不利であると言われているが，このことがLEVの知覚にも影響する可能性が示唆される．

次に，Hall Bについて見てみる．各測定点における物理量を**Fig. 3**に，$\mathrm{LEV_p}$およびホールの平面図，断面図を**Fig. 4**に示す．**Fig. 4**から，Hall Bの$\mathrm{LEV_p}$は変化幅が大きく，特に客席最後部の測定点No.10～12において$\mathrm{LEV_p}$が非常に小さいことがわかる．**Fig. 3**を見ると，これらの測定点ではC_{80}が顕著に大きく，初期音に対して後期音エネルギが極端に減少している．また，DLRでは上方成分が側方および後方に比べて極端に低下している．このような後期音エネルギの減少および到来方向分布の著しい偏りがLEVを低下させる要因となっていると考えられる．

次に，Hall Cについて見てみる．各測定点における物理量を**Fig. 5**に，$\mathrm{LEV_p}$およびホールの平面図，断面図を**Fig. 6**に示す．**Fig. 6**から，半数以上の測定点で$\mathrm{LEV_p}$の差が0.68以内に収まっており，客席位置の違いによる

LEV の知覚の差は小さい．これは，C_{80} の変化幅が小さいことに起因していると考えられる．一方，測定点 No.1 の LEV_p が他の測定点に比べて小さいが，これは C_{80} とともに DLR の影響を強く受けているものと推定される．

次に Hall D について見てみる．各測定点における物理量を **Fig. 7** に，LEV_p およびホールの平面図，断面図を **Fig. 8** に示す．**Fig. 8** から，1 階席および 2 階席のバルコニー下の測定点 No.7，8，11，12 において，LEV_p が小さいことがわかる．**Fig. 7** をみると，これらの測定点では Hall A の No.5，6 と同様に C_{80} が大きく，特に No.7，8 については後期音の上方成分 VE_{late} が低下しているというように，一般的なバルコニー下の客席の特徴を示している．しかしながら，半数以上の測定点で LEV_p の差は 0.68 以内に収まっており，変化幅も今回対象とした 5 ホールの中では最小である．**Fig. 7** より，バルコニー下以外の測定点では C_{80} および後期音の方向分布のばらつきが小さく，このことが LEV に大きな差を生じさせない要因となっていると考えられる．

最後に，Hall E について見てみる．各測定点における物理量を **Fig. 9** に，LEV_p およびホールの平面図，断面図を **Fig. 10** に示す．**Fig. 10** から，音源からの距離が大きくなるほど LEV_p は小さくなっているのがわかる．また **Fig. 9** をみると，音源からの距離が大きくなるほど C_{80} が大きく，その変化幅は 5 ホール中で最大である．すなわち，後期音エネルギの減少が LEV の低下に大きな影響を与えていると考えられる．DLR については側方および上方成分が 2 階席の測定点 No.9，10，12，13 で低下しているが，そのことによって LEV_p が極端に低下するというような傾向は認められない．

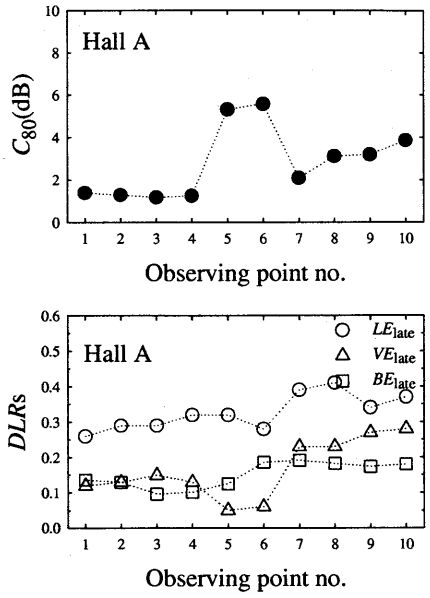

Fig. 1 C_{80} and DLRs measured in Hall A.

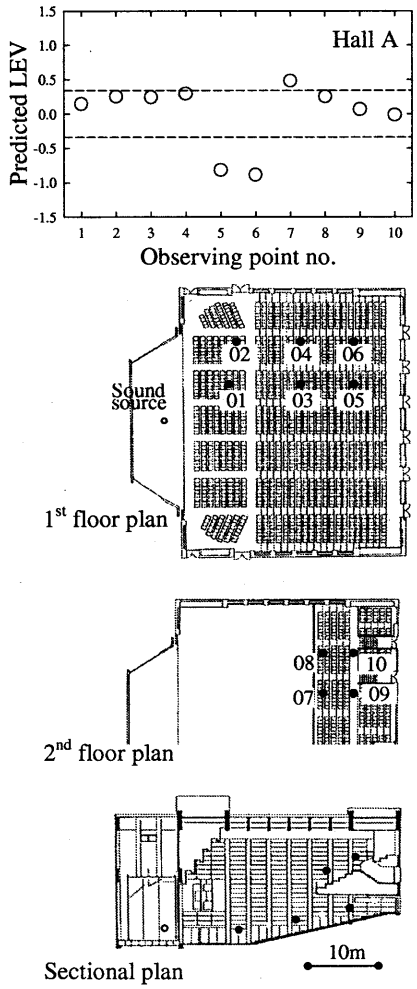

Fig. 2 Predicted LEV at all observing points in Hall A.

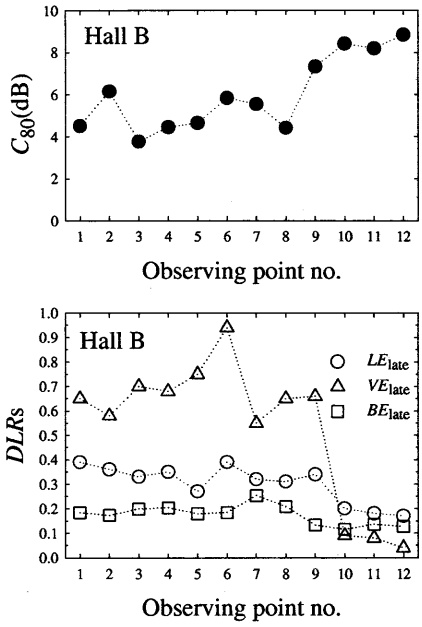

Fig. 3 C_{80} and DLRs measured in Hall B.

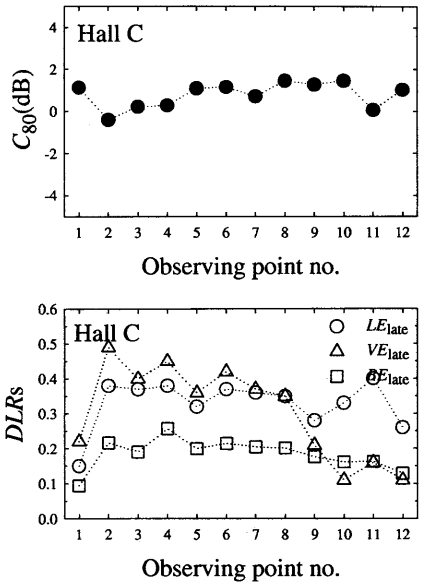

Fig. 5 C_{80} and DLRs measured in Hall C.

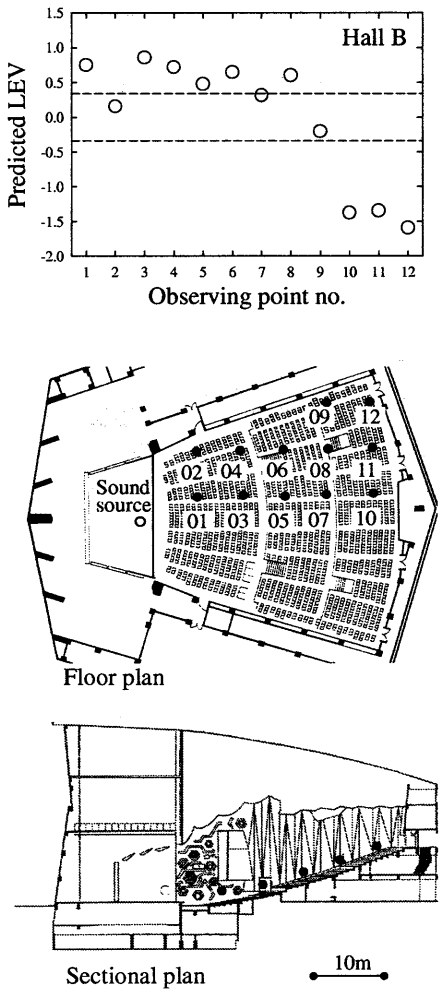

Fig. 4 Predicted LEV at all observing points in Hall B.

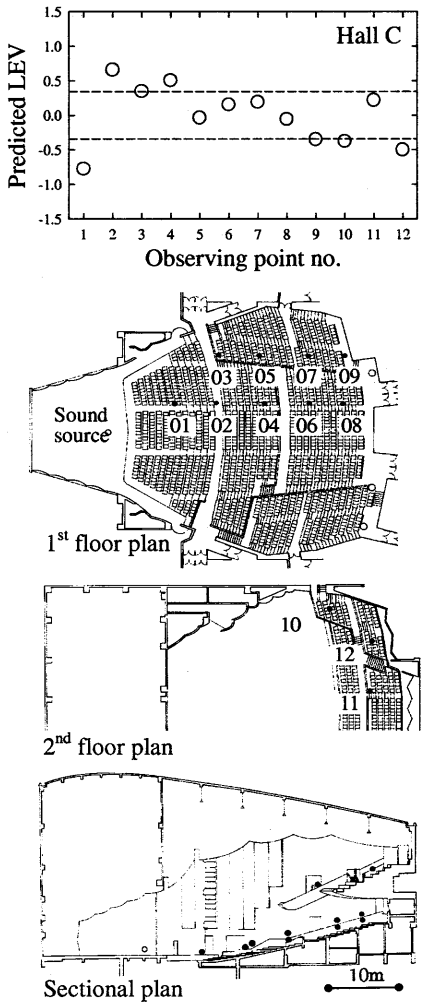

Fig. 6 Predicted LEV at all observing points in Hall C.

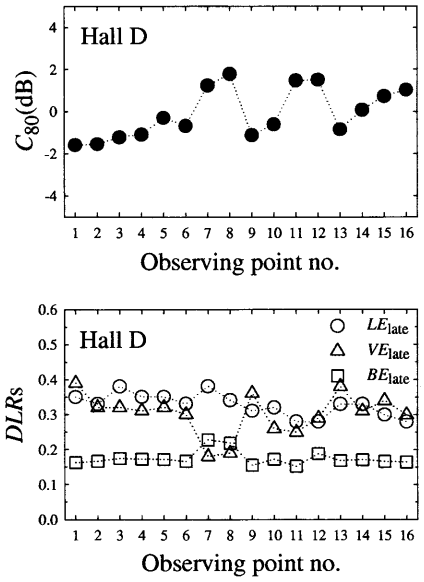

Fig. 7 C_{80} and DLRs measured in Hall D.

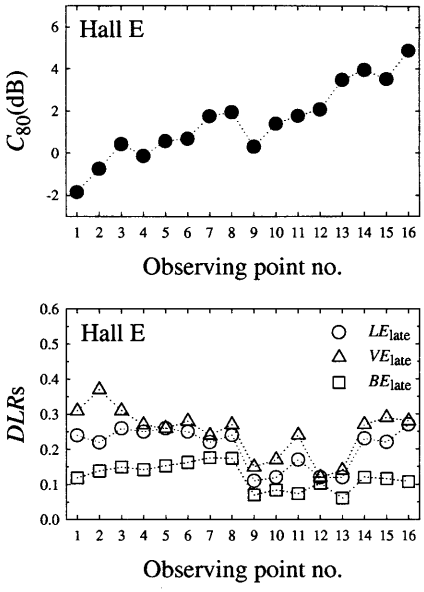

Fig. 9 C_{80} and DLRs measured in Hall E.

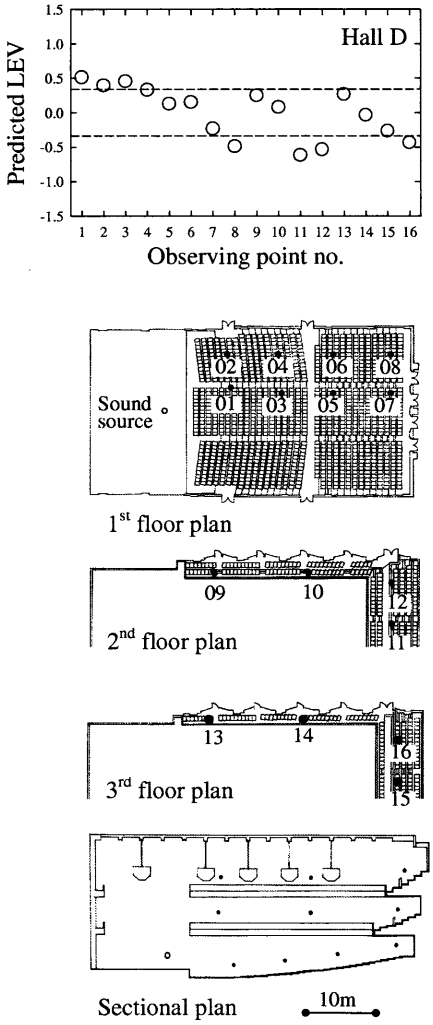

Fig. 8 Predicted LEV at all observing points in Hall D.

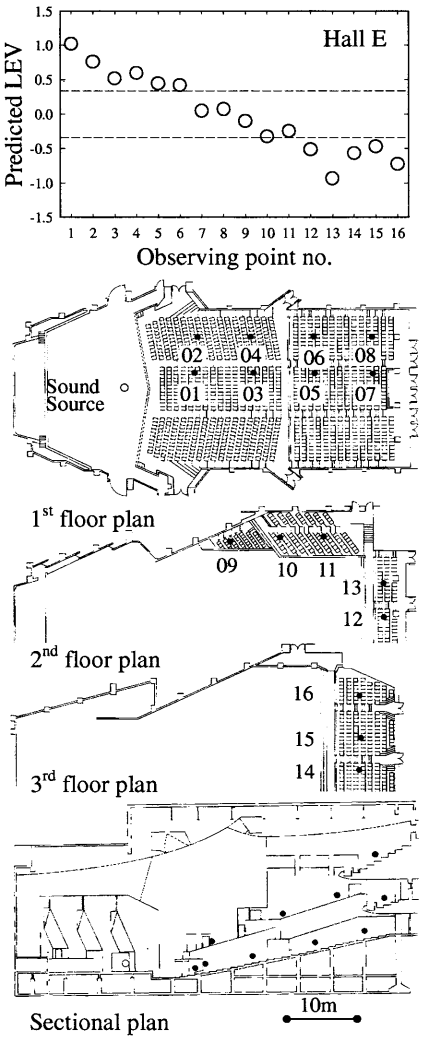

Fig. 10 Predicted LEV at all observing points in Hall E.

3.2 LEV_p の変化幅

LEV の観点からホール音場の傾向を検討するために，各ホールにおける LEV_p の変化幅および LEV_p の測定点間の相対差が 0.68 以上となる測定点対の全測定点対に対する割合 R_p を算出し **Table 2** に示す．

いずれのホールについても LEV_p の変化幅は 0.68 以上であり，客席内において LEV の知覚に有意な差が生じていると推定される．しかしながら，LEV_p の変化幅および R_p はホールによって異なる．例えば LEV_p の変化幅が大きい Hall B，E では R_p も大きい (Hall B: 52%，Hall E: =45%)．これらのホールは C_{80} の変化幅が大きく，また Hall B については後期音の方向分布の測定点間のばらつきも大きい．一方，シューボックス型コンサートホールである Hall D は C_{80} および後期音の方向分布について測定点間のばらつきが小さく，LEV_p の変化幅および R_p も小さい (R_p=26%)．

このように，後期音特性のばらつきによって LEV の知覚に客席間での有意差が生じることが推測され，またホールごとにその傾向は異なることがわかった．

Table 2 Range of the variation on predicted LEV and rate for pair of observing points with the difference of LEV_p larger than 0.68, R_p.

Hall	Number of observing points	Range of LEV_p	R_p (%)
A	10	1.37	36
B	12	2.45	52
C	12	1.43	27
D	16	1.13	26
E	16	1.96	45

3.3 LEV を考慮した音響設計に向けて

以上のように，既存のホール音場における LEV の知覚には客席によって有意な差が生じていると推測され，LEV が音場評価に影響を与える可能性が示された．

LEV の評価を考慮した音響設計を行うためには，Hall B，E のように客席によって LEV の尺度値に大きな差が生じるという状態を避けるための設計が必要である．筆者らがこれまで示してきた知見 (LEV は，初期音／後期音エネルギ比および側方，後方，上方から到来する後期音の方向分布と関連が深い) から，例えば，側方からの後期音が得にくい客席では，上方や後方から有効な反射音を到来させる等の工夫をすることにより場内の LEV の変化幅を小さくするというように，LEV に配慮した設計が可能になるものと考えられる．

4. まとめ

実測調査で得た C_{80} および方向別後期音エネルギ率 DLR を，これまでの音響心理実験から得られている後期音の方向特性と LEV の関係に適用して，ホールの客席内における LEV 尺度値を推定した．その結果，ホール内では客席によって LEV の知覚に有意な差が生じていると推定され，これより LEV がホール音場の評価に影響を与えることが示唆された．このことから後期音の方向特性と LEV の関係を考慮した音場評価の重要性を確認した．

今後は，LEV を考慮した音場評価手法を確立するために後期音特性を反映させた LEV の物理指標を導出し，音響設計に使用可能な物理指標の基準値を検討する必要がある．

参考文献

1) 森本政之, 藤森久嘉, 前川純一: 見かけの音源の幅と音に包まれた感じの差異, 日本音響学会誌, Vol.46, pp.449-457, 1990.6.
2) H. Furuya, K. Fujimoto, Y. J. Choi and N. Higa: Arrival direction of late sound and listener envelopment, *Applied Acoustics*, Vol.62, pp.125-136, 2001.2.
3) A. Wakuda, H. Furuya, K. Fujimoto, K. Isogai and K. Anai: Effects of arrival direction of late sound on listener envelopment, *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol.24, pp.179-185, 2003.7.
4) A. Wakuda, Y. Nakano, H. Furuya and K. Fujimoto: Contribution of total energy and directional components of late sound to listener envelopment, *Proc. of ICA 2004*, IV-2461-2464, 2004.4.
5) A. Wakuda, H. Furuya, K. Anai and K. Fujimoto: Directional characteristics of late sounds in concert auditoria, *Proc. of FORUM ACUSTICUM SEVILLA 2002*, RBA-02-014, 2002.9.
6) L. L. Thurstone: A law of comparative judgment, *Psychological Review*, Vol.35, pp.273-286, 1927.7.

(受理：平成 17 年 6 月 2 日)