

平成 30 年 3 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23700234

研究課題名(和文)歌唱訓練に適した音響空間の実現と歌唱における感覚運動制御の解明に向けた実験的研究

研究課題名(英文) Experimental investigation toward development of sound fields for singing training and understanding of sensory-motor integration in singing

研究代表者

加藤 浩介 (Kato, Kosuke)

大阪大学・産学連携本部・講師

研究者番号：90444504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、音場が歌唱に与える影響に着目し、歌唱時における体性感覚・聴感印象および発声された歌声の音響的特徴に対して音場が及ぼす影響を検証した。その結果、次の3点が示された。1) 残響条件によって、異なる聴感的印象の歌声が発声される。2) 残響条件によって、歌唱者が異なる体性感覚・異なる聴感的印象を感じながら発声を行う。3) 残響条件によって、異なる声帯振動が起こり、異なる音響的特徴の歌声が発声される。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the effect of room acoustics on singing in terms of motor perception, auditory impression, and audio features of vocalized singing voice. The results of this study lead to the following conclusions: 1. Under room acoustic conditions with different reverberation, singers vocalize their singing voice to be perceived with different auditory impression. 2. Singers perceive different motor perception and different auditory impression when singing under room acoustic conditions with different reverberation. 3. Under room acoustic conditions with different reverberation, singers vocalize singing voice with different vocal cord vibration and different audio features.

研究分野：人間情報学

キーワード：歌唱

1. 研究開始当初の背景

音楽教育学および音楽知覚認知学の分野等において、歌唱に関する研究が行われているが、これらの研究では、音場という環境要因が考慮されていなかった。

こうした中、申請者は十年以上、室内音響学と音楽知覚認知学が融合する領域において、音場が演奏に与える影響を研究し、以下の点を明らかにしてきた。

- ・ 独唱者にとって歌いやすい単一反射音場は、歌声の音響的特徴によって異なる (J. Acoust. Soc. Am. 115, 2436-2437, 2004)。

- ・ プロの独奏者はホール音響に応じて演奏を調整する (The 19th International Congress on Acoustics, MUS03-005, 2007)。

これらの研究成果は、音場という環境要因が歌唱に何らかの影響を与えることを示唆するものである。音場が歌唱に与える影響をより詳細に明らかにすれば、ヒトの感覚運動系の機構に対する理解が深まると共に、歌唱訓練に適した音響空間が実現されるなど、多くの人の QoL および経験の質 (QoE: Quality of Experience) 向上に貢献できるものと期待される。

2. 研究の目的

本研究は、音場という環境要因がヒトの感覚運動制御に与える影響について基礎的な知見を得ようとするものである。

具体的には、歌唱に関する従来研究では考慮されていなかった、音場が歌唱に与える影響に着目し、歌唱時における、聴感印象、体性感覚、声門開閉、および発声された歌声の音響的特徴に対して音場が及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

歌唱者が残響を伴った自身の歌声を聴きながら歌唱する際に、残響条件によって歌唱者の発声がどのように変化をするかを、以下の手順により検証した。

<実験 1>

・ 歌唱者に対する音場呈示：6 チャンネル収音・再生システムを用いて、表 1 に示す 5 種類のステージ音場 (AE, HS, HM, HL, CH) におけるインパルス応答を歌声に実時間で畳み込んで、プロとして 14 年のキャリアを有し年間 60 回程程度のリサイタルを行っているバリトン歌唱者 1 名に呈示した (図 1)。表 1 における、 RT_s は、ステージ上の演奏者の位置で測定した残響時間 (T_{60}) を示す。それ以外の指標は、それぞれ以下の計算式により算出されるものである。

$$L_{early100} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{100ms} p^2(t) dt} \right\} \quad [dB],$$

$$L_{late100} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_{10ms}^{100ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{100ms} p^2(t) dt} \right\} \quad [dB],$$

$$L_{all} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_{0ms}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt} \right\} \quad [dB],$$

$$G_{early100} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_{0ms}^{100ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt} \right\} \quad [dB],$$

$$G_{late100} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt + \int_{100ms}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt} \right\} \quad [dB],$$

$$G_{all} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_{0ms}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{10ms} p^2(t) dt} \right\} \quad [dB].$$

表 1：歌唱実験における音場条件

	AE	HS	HM	HL	CH
RT_s	0	1.2	1.7	2.2	2.7
$L_{early100}$	-	-14.3	-20.9	-21.9	-16.2
$L_{late100}$	-	-17.3	-22.7	-18.8	-17.3
L_{all}	-	-12.5	-18.7	-17.1	-13.7
$G_{early100}$	0	0.158	0.035	0.028	0.103
$G_{late100}$	0	0.08	0.023	0.057	0.08
G_{all}	0	0.236	0.058	0.085	0.181

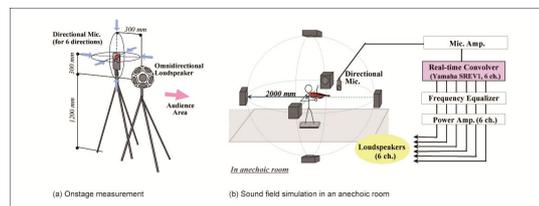


図 1：音場シミュレーションシステム

・ 演奏曲：演奏曲はロングトーンを含むテンポの遅い曲として Ave Maria by Schubert の

冒頭（以下 A と表記） およびテンポの速い曲として Gia il sole dal gange by Scarlatti（以下 G と表記）の冒頭を選んだ（図 2）演奏曲のキーについては、演奏家の好みで設定してもらった。

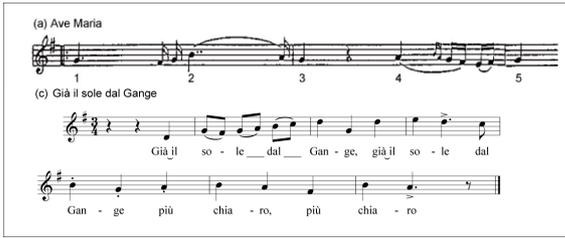


図 2：演奏曲の楽譜

・手続き：実験は演奏とインタビューからなる。各音場条件において、はじめに音場の特徴をつかむために演奏してもらい感想を尋ねた。次に 2 種類の課題曲、および単音や自由曲等を各 3 回繰り返して演奏してもらい、その後演奏表現上の工夫について聴取した。同時に、付加した残響の影響を極力受けないように楽器と近接した指向性マイクロフォンにより演奏音を収録した。この条件において、音場からのフィードバック音のレベルは、フィードバック音のレベルが最も大きい音場 HS の場合でも、直接音よりも 17.2 dB 低かった。

・声量の評価：声量を定量的に評価する目的で、ITU-R BS.1770-3 で定義されている Gated loudness (L_{KG}) により、曲 A と曲 G に対して各音場でそれぞれ収録された歌声（2 music × 5 rooms × 3 trials）を音響解析した。また、音場による声量の差異を定量化するために、以下の式に示す正規化を行った。

$$n_L_{KGm,r,t} = L_{KGm,r,t} - \overline{L_{KGm}} \quad [\text{LU}]$$

・音高（ピッチ）チューニングの評価：ピッチチューニングを定量的に評価する目的で、曲 A の歌唱において収録されたロングトーン（5 rooms × 5 notes × 3 trials）を対象として、窓長 20 ms ホップサイズ 4 ms の自己相関関数分析により抽出された基本周波数 F_0 を音響解析した。また、音場によるピッチチューニングの差異を定量化するために、以下の式に示す正規化を行った。

$$n_MF_{0r,t} = MF_{0r,t} - \overline{MF_{0n}} \quad [\text{cents}]$$

<実験 2 >

・歌唱実験：残響発生装置による音場呈示システムを構築し、同システム内において母音のロングトーン発声からなる歌唱タスクを、歌唱者が発声した。

・歌声の収録：上記歌唱実験の際、歌唱者の前方 50cm に設置された騒音計のマイクロフォンおよびヘッドセットに装着した歌手の

口から 7cm の位置に設置したマイクロフォンにより、歌唱者の歌声を収録した。

・収録された歌声の聴感的差異の検証：収録された歌声を実験者が聴取することにより、歌唱者により発声された歌声の聴こえ方が、歌唱者に呈示された残響条件によってどのように異なるかを聴感的に評価した。

・歌唱時に歌唱者が感じた感覚的差異の検証：歌唱実験直後の歌唱者に対して実験者がインタビューを行い、歌唱者による主観申告を聴取した。具体的には、各残響条件下において歌唱者がどのように発声を行い、発声時に感じる体性感覚および歌唱者自身の歌声に対する聴感的印象が、残響条件によってどのように異なっていたかを聴取した。

・声門開閉の差異の検証：電気声門図 (Electro glotto graph: EGG) は、左右の甲状軟骨板外側の皮膚面に電極を置いて高周波電流を流し、声帯の開閉による電気的インピーダンスの変化を、非侵襲的に計測・収録できる計測装置である。本研究では、EGG を用いて、歌唱者の声門開閉が、歌唱者に呈示された残響条件によってどのように異なるかを評価した。

・収録された歌声の音響的差異の検証：収録された歌声を信号処理により解析し、歌唱者が発声した歌声の音響的特徴が、歌唱者に呈示された残響条件によってどのように異なるかを評価した。

4. 研究成果

<実験 1 >

・声量の差異：残響条件によって、異なる声量の歌声が発声されることが示された（図 3 左）。また、 n_L_{KG} と G_{all} の相関係数は -0.77（危険率 1% 有意）となり、残響のエネルギーが大きいほど、声量が小さくなることが示された。

・ピッチチューニングの差異：残響条件によって、異なる基本周波数の歌声が発声されることが示された（図 3 右）。

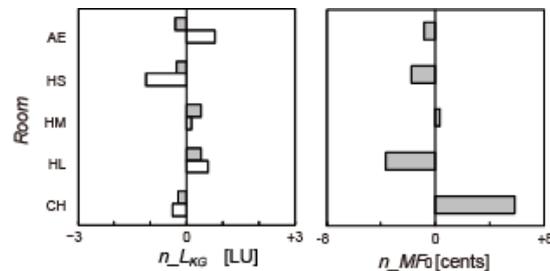


図 3：各音場で発声された歌声の声量およびピッチチューニングの差異。グレー：曲 A、白：曲 G。

<実験 2 >

・収録された歌声の聴感的差異の検証：残響条件によって、異なる聴感的印象の歌声が発声されることが示された。具体的には、音量や声質に関する聴感的印象に差異が見られた。

・歌唱時に歌唱者が感じた感覚的差異の検証：残響条件によって、歌唱者が異なる体性感覚・異なる聴感的印象を感じながら発声を行うことが示唆された。具体的には、喉の絞まり具合や、発声のしやすさなどに関する歌唱者の主観申告が得られた。

・声門開閉の検証：残響条件によって、異なる声門開閉が生じることが示された(図4)。

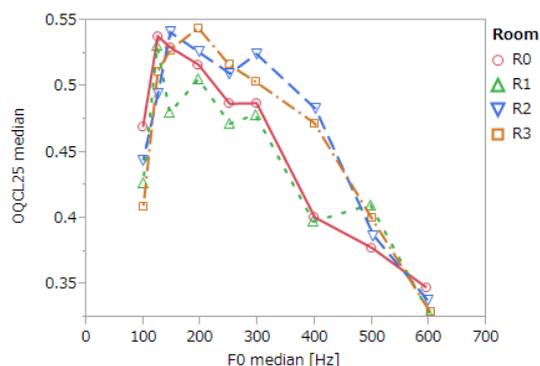


図4：残響時間を2秒に固定し残響レベルが4段階で異なる音場(R0:システム off, R1:直接音 -20 dB, R2:直接音 -5dB, R3:直接音 +10dB)でロングトーン母音を歌唱した際における声門開放時間率(OQ_{CL25})の差異。400Hzの歌唱母音において、R0・R1とR2・R3ではOQ_{CL25}に0.1相当の顕著な差が見られる。

・収録された歌声の音響的差異の検証：残響条件によって、異なる音響的特徴の歌声が発声されることが示された(図5)。

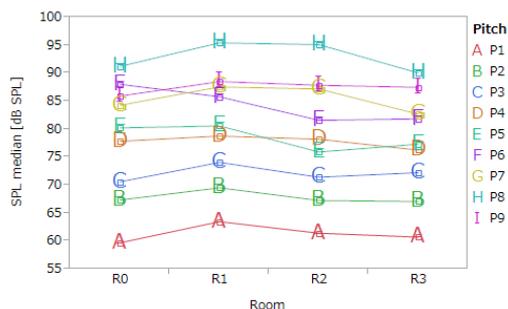


図5：残響時間を2秒に固定し残響レベルが4段階で異なる音場(R0:システム off, R1:直接音 -20 dB, R2:直接音 -5dB, R3:直接音 +10dB)でロングトーン母音を歌唱した際における歌唱者の前方50cmに設置された騒音計のマイクロフォンで計測された音圧レベル。残響レベルとPitchを要因とする二元配置分散分析の結果、音圧レベルに対するRoomの有意な効果(p<0.01)が見られた。

これらの研究成果は、残響音場という環境要因が歌唱に有意な影響を与えることを示すものである。

音場が歌唱に与える影響をより詳細に明らかにすれば、ヒトの感覚運動系の機構に対する理解が深まると共に、歌唱訓練に適した

音響空間が実現されるなど、多くの人のQoLおよび経験の質(QoE: Quality of Experience)向上に貢献できるものと期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Kosuke Kato, Kanako Ueno, Keiji Kawai, Effect of Room Acoustics on Musicians' Performance. Part II: Audio Analysis of the Variations in Performed Sound Signals, Acta Acustica united with Acustica, 査読有 Vol. 101 No. 4号 pp. 743-759, 2015.

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 浩介 (KATO, Kosuke)

大阪大学・産学連携本部・

総合企画推進部・講師

研究者番号：90444504

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

榊原 健一 (SAKAKIBARA, Ken-Ichi)

北海道医療大学・心理科学部・

准教授

研究者番号：80396168

川井 敬二 (KAWAI, Keiji)

熊本大学・大学院自然科学研究科・

准教授

研究者番号：90284744