

# ジュウシマツの歌発声におけるロンバード効果と基本周波数の変化

芝慎太郎<sup>†1</sup> 橘亮輔<sup>†1,2</sup> 岡ノ谷一夫<sup>†1</sup>

雑音が存在する環境において、聴覚入力によって発声音の変化が生じることがあり、特に振幅が増加する現象はロンバード効果と呼ばれる。本研究では、発声における聴覚との相互作用を明らかにするため、ヒトの発声のモデル動物であるジュウシマツを対象として、雑音環境下での歌発声の音響特徴量の変化を調べた。結果、雑音の周波数帯域によって程度の異なる振幅の増加と、個体傾向のある基本周波数の変化がみられた。

## 1. はじめに

ヒトを含む様々な動物が音声コミュニケーションをおこなう。ヒトは通常、意図した内容を意図した通りに発声するだけではなく、周囲の音環境にあわせて発声を不随意的に変化させる。すなわち聴覚と発声の間に相互作用が存在する。発声のメカニズムを解明するためには、この相互作用を考慮にいれた研究をする必要とする。

聴覚と発声の相互作用によって生じる発声変化の1つの例として、ロンバード効果がある[1]。ロンバード効果とは、雑音環境下で発声の振幅が増加する現象であり、不随意的ではあるものの単純な反射だけでは説明できない[2][3]。ヒトにおけるロンバード効果は発見されて以来、被験者の聴覚異常を調べるために使われ、近年では音声認識の技術にも関与している[4]。しかしさまざまな行動実験がおこなわれてきたにも関わらず、ロンバード効果の神経メカニズムはヒトでもヒト以外の動物でもまだよく分かっていない。また、雑音環境下では振幅増加だけでなく、基本周波数や時間長といった他の音響特徴量の変化も報告されてきた[5]。これらの現象を解明するには、ヒトとヒト以外の動物との比較行動学・比較神経科学的研究が重要である。実際にロンバード効果は、ヒト以外の霊長類、鳥類、ネコ、クジラ、コウモリ、カエルなど多くの動物でもみられ、また種によっては発声の他の音響特徴量の変化も報告されてきた[6]。

スズメ目カエデチョウ科の小鳥であるジュウシマツ (*Lonchura striata* var. *domestica*) は、複雑な歌発声(さえずり)を学習によって獲得すること、歌発声時に実時間の聴覚フィードバック情報を利用することからヒトの発声のモデル動物とみなされている[7]。過去の研究では、雑音環境での歌全体としての振幅の増加が報告されている[8]。

ジュウシマツは歌発声時に実時間の聴覚フィードバック情報を利用するため、聴覚と発声の相互作用が顕著にあらわれる可能性があり、これを研究するのに適している[9]。

そこで本研究では、聴覚と発声の相互作用について明らかにするため、ジュウシマツ歌発声の雑音環境下での変化を調べた。使用する雑音を帯域別にし、歌全体としてではなく歌の個々の音要素ごとに分析することで、雑音環境下で発声の振幅・基本周波数がどのように変化するかを調べた。

## 2. 方法

### 2.1 実験手続き

成鳥のジュウシマツのオス 13羽に対し、4種類の雑音刺激を無作為な順番で提示した。うち2つは高周波帯域雑音 (Butterworth 型, 通過帯域 4.0–7.8 kHz: ‘High’) であり、残りの2つは低周波帯域雑音 (Butterworth 型, 通過帯域 0.2–4 kHz: ‘Low’) だった。それぞれの雑音の音圧レベルが 60 dBA (‘Soft’) と 70 dBA (‘Loud’) となるように調整し、これらの4種類の雑音を High Soft / High Loud / Low Soft / Low Loud として提示した。刺激提示と録音は午前8時から午後5時20分までの1日中おこなった。音響特徴量の日内変動を考慮するため、1日を7回の実験サイクルに分割し、1サイクルの80分の間に、4種類の雑音を20分おきに10分ずつ再生した。

### 2.2 解析

統制条件と雑音条件を比較できるように、得られたすべての録音データから、提示した雑音の周波数帯域を帯域通過フィルタにより低減した。個体、サイクル、刺激5条件(4雑音条件+統制条件)ごとにまとめ、各音要素(ノート)を検出し、分類した。分類には線形サポートベクタマシンによる教師あり多クラス分類を用いた[4]。ノートごとにFFT(8192点)をおこなって音要素を周波数スペクトルに変換し、あらかじめ設定された周波数範囲内で最大振幅となる周波数を得た。その周波数の前後5点を二次曲線に近似し、ピーク周波数とその振幅を推定した。この周波数が基本周波数の倍音成分だった場合には、倍音の次数で割って基本周波数を算出し、これを基本周波数とした。音響特徴量の日内変動を補正し、1日の平均音響特徴量をラベル・条件ごとに計算した。それらの平均値に対し、High Control, High Soft, High Loud 条件間, Low Control,

<sup>†1</sup> 東京大学大学院総合文化研究科  
Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo

<sup>†2</sup> 日本学術振興会特別研究員  
JSPS Postdoctoral Fellowship

Low Soft, Low Loud 条件間でそれぞれフリードマン検定をおこなった。

### 3. 結果

全てのジュウシマツのノートの振幅、基本周波数の雑音条件下での変化は表1のようになり、調べたラベルの条件ごとの特徴量の平均値は振幅・基本周波数ともにやや増加・上昇した。数値は統制条件からの変化量を示し（平均±標準偏差）、dB と cent は振幅と周波数のそれぞれ対数値である。

表 1 各雑音条件における音響特徴量の統制条件からの変化量（平均±標準偏差）

条件	High Soft	High Loud	Low Soft	Low Loud
振幅 (dB)	0.80 ± 0.86**	0.70 ± 0.99**	0.56 ± 1.18 †	0.71 ± 1.94
基本周波数 (cent)	7.82 ± 13.46*	4.66 ± 16.65	3.01 ± 19.90	4.47 ± 28.89

\*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ , † $p < 0.1$ .

100 cent = 半音.

結果を個体ごとにまとめたものを図1（振幅）と図2（基本周波数）に示す。それぞれ上側（A）が High 条件，下側（B）が Low 条件での統制条件からの増加量を個体ごとに平均した。

振幅は、High の 2 条件で統計的に有意に増加（フリードマン検定,  $N = 31$  notes,  $p < 0.01$ ,  $df = 2$ ,  $\chi^2 = 17.48$ 。下位検定 Control-Soft:  $p < 0.01$ , Control-Loud:  $p < 0.01$ , Soft-Loud:  $p = 0.991$ ) し、Low Soft 条件で有意傾向の増加が見られた（フリードマン検定,  $N = 21$  notes,  $p = 0.065$ ,  $df = 2$ ,  $\chi^2 = 5.48$ ）。

基本周波数は High Soft 条件で有意に上昇したのみだった（フリードマン検定,  $N = 31$  notes,  $p < 0.05$ ,  $df = 2$ ,  $\chi^2 = 7.16$ 。下位検定 Control-Soft:  $p < 0.05$ , Control-Loud:  $p = 0.280$ , Soft-Loud:  $p = 0.488$ ）。

### 4. 考察

High の 2 条件で振幅の増加がみられたことから、ジュウシマツにおいてノート単位でロンバード効果が起こることが確認された。Low 条件では個体によるばらつきが大きく、全体として顕著な傾向はみられなかった。したがって、雑音の周波数帯域によって振幅の変化の仕方が異なることが示された。

一方、基本周波数は High Soft 条件で上昇という限定的な結果に留まった。雑音環境下で基本周波数が増えると言いつけることはできないが、個体 'bf01' のみ全ての条件で

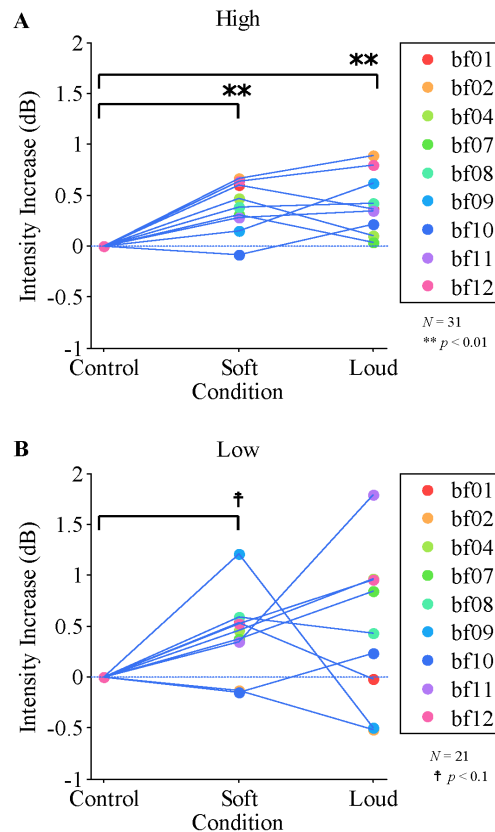


図 1 雑音条件における振幅変化

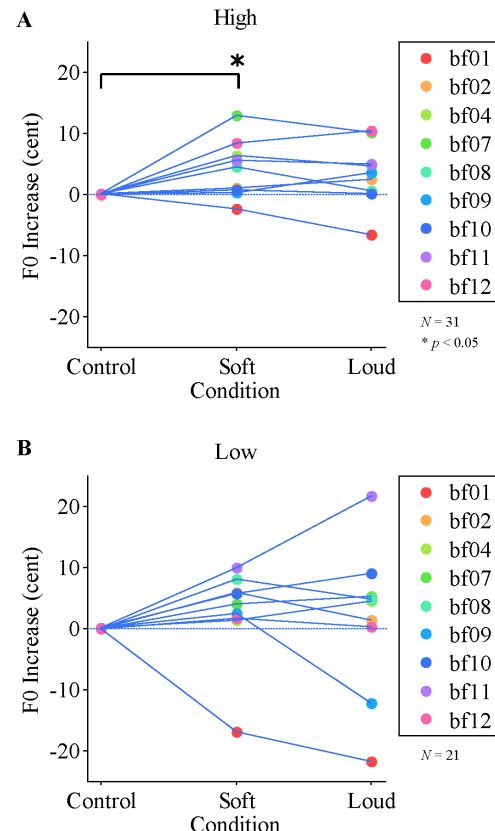


図 2 雑音条件における基本周波数変化

全てのノートの周波数を低下させていた(図3)。上側(A)がHigh条件, 下側(B)がLow条件での, 各個体から調べたラベルごとの基本周波数の変化を示している。この個体‘bf01’を除いた残りのラベルに対して統計的検定をおこなうと, 基本周波数の上昇は High Soft, High Loud, Low Loud 条件で統計的に有意となった(フリードマン検定, High:  $N = 25$  notes,  $p < 0.01$ . 下位検定 Control-Soft:  $p < 0.01$ , Control-Loud:  $p < 0.01$ , Soft-Loud:  $p = 0.901$ . Low:  $N = 17$  notes,  $p < 0.05$ . 下位検定 Control-Soft:  $p = 0.099$ , Control-Loud:  $p < 0.05$ , Soft-Loud:  $p = 0.864$ ). このことから, 雑音環境下でのノートの基本周波数には, 個体によって変化傾向があることが示唆された。実際の基本周波数の変化には, 個体による変化傾向とノート自体の音響特徴の両方が影響していると考えられる。

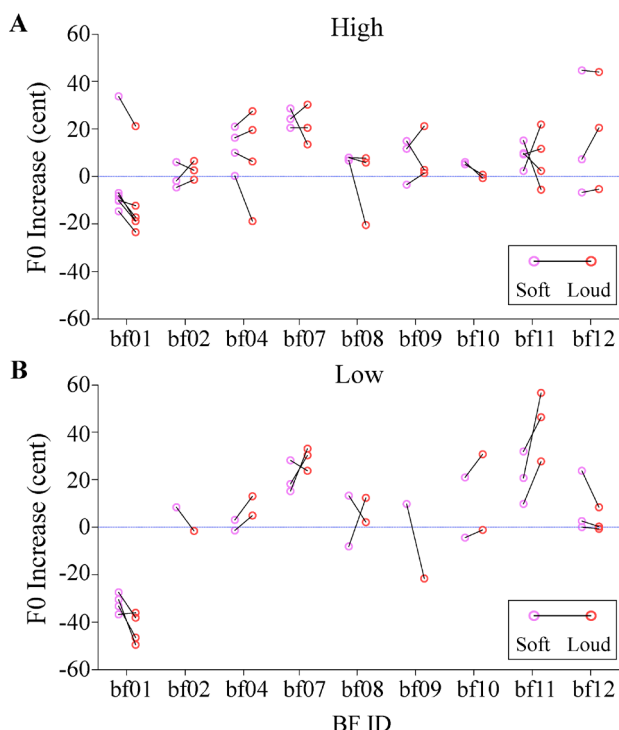


図3 個体ごとの全ラベルの基本周波数変化

## 5. まとめ

本研究では, 発声と聴覚がどのように相互作用するかを明らかにするため, 雑音環境下でのジュウシマツの歌発声における振幅と基本周波数の変化を調べた。結果, ノート単位で振幅の増加が見られることがわかった。また, 基本周波数の変化は, 個体内に一貫した傾向が存在することも示された。

雑音の周波数帯域の違いによる振幅への影響の違いと, 基本周波数の変化の方向性の個体差が生じる理由については明らかではない。この個体差をより詳細に調べるには, 音響特徴量の変化を, 個体による要因と, そのノートの音

響特徴量自体による要因に分離する必要があるだろう。今後これらを明らかにする過程で, 雑音環境下での歌発声変化についてより詳細な知見が得られ, 発声メカニズムの解明にも繋がることを期待される。

## 参考文献

- 1) Lombard, E.: Le signe de l'elevation de la voix. Ann. Maladies Oreille, Larynx, Nez, Pharynx, Vol.37, pp.101-119 (1911).
- 2) Brumm, H. and Zollinger, S. A.: The evolution of the Lombard effect: 100 years of psychoacoustic research, Behaviour, Vol.148, pp.1173-1198 (2011).
- 3) Pick Jr, H. L. et al.: Inhibiting the Lombard effect, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.85, pp.894-900 (1989).
- 4) Junqua, J. C.: The Lombard reflex and its role on human listeners and automatic speech recognizers, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.93, pp.510-524 (1993).
- 5) Stowe, L. M. and Golob, E. J.: Evidence that the Lombard effect is frequency-specific in humans, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.134, pp.640-647 (2013).
- 6) Brumm, H. and Slabbekoorn, H.: Acoustic communication in noise, Advances in the Study of Behavior, Vol.35, No.9, pp.151-209 (1991).
- 7) Bolhuis, J. J. et al.: Twitter evolution: converging mechanisms in birdsong and human speech, Nature Reviews Neuroscience, Vol.11, pp.747-759 (2010).
- 8) Kobayasi, K. I. and Okanoya, K.: Context-dependent song amplitude control in Bengalese finches, Neuroreport, Vol.14, pp.521-524 (2003).
- 9) Dooling, R. J.: Behavior and psychophysics of hearing in birds. Comparative studies of hearing in vertebrates, Springer, pp.261-288: (1980).
- 10) Tachibana, R. O. et al.: Semi-Automatic Classification of Birdsong Elements Using a Linear Support Vector Machine, PloS one, Vol.9, e92584 (2014).