

Title	合唱音声の合成における基本周波数制御に関する基礎研究
Author(s)	桑原, 彰宏
Citation	
Issue Date	2010-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/8958
Rights	
Description	Supervisor:徳田功, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

合唱音声の合成における
基本周波数制御に関する基礎研究

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

桑原 彰宏

2010 年 3 月

修 士 論 文

合唱音声の合成における
基本周波数制御に関する基礎研究

指導教官 徳田功 准教授

審査委員主査 徳田功 准教授
審査委員 党建武 教授
審査委員 鵜木祐史 准教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

0710027 桑原 彰宏

提出年月: 2010 年 2 月

概 要

演奏の指導や練習を支援するのに有効なため、演奏の客観的な評価に関する知見が必要とされている。本研究では、合唱における基本周波数について扱い、客観的な評価である上手さに影響を及ぼす特徴量の定量的な解明を目指し、特徴量を様々に制御した合唱音声合成し評価実験を行った。合唱での評価に影響を及ぼす基本周波数の特徴量として、協和音程からのずれ、発声タイミングのずれ、ヴィブラートの位相差と周波数差に着目し調査した結果、各々に関して評価を大別する基準となる区間を得ることができた。また、発声タイミングのずれよりも協和音程からのずれの方が評価に大きく影響している可能性も示唆した。さらに、これらの評価基準の妥当性を検証するために実際の人による合唱を解析した結果、協和音程からのずれと発声タイミングのずれに関して評価を大別する区間と、発声タイミングのずれよりも協和音程からのずれの方が評価に大きく影響することが実際の人による合唱においても概ね対応していることが確認できた。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	研究方針	3
2.1	はじめに	3
2.2	合唱音声の合成システム	3
2.3	合唱での評価に影響を及ぼす基本周波数の特徴量	5
第3章	合唱音声の評価実験	8
3.1	はじめに	8
3.2	特徴量を制御した合唱音声の詳細	8
3.3	聴取実験	14
3.4	結果考察	15
3.5	まとめ	21
第4章	合唱実験	22
4.1	はじめに	22
4.2	実験条件	22
4.3	解析手法	24
4.4	結果考察	24
4.5	まとめ	28
第5章	結論	29
5.1	本論文で明らかになったことの要約	29
5.2	今後の課題	29

目 次

2.1	合成システム	6
2.2	歌声に含まれる基本周波数の動的变化成分	7
3.1	使用した童謡「紅葉」の譜面	10
3.2	童謡「紅葉」の2パートの時間変動	10
3.3	協和音程からのずれの制御	11
3.4	発声タイミングのずれの制御	11
3.5	ヴィブラートの位相差の制御（完全1度）	12
3.6	ヴィブラートの周波数差の制御（完全1度）	13
3.7	シェッフェの一対比較実験で用いた合唱の上手さに関する5段階評価尺度	14
3.8	協和音程からのずれに関する刺激の距離関係	17
3.9	発声タイミングのずれに関する刺激の距離関係	17
3.10	協和音程からのずれと発声タイミングのずれに関する刺激の距離関係	18
3.11	ヴィブラートの位相差に関する刺激の距離関係（完全1度）	19
3.12	ヴィブラートの周波数差に関する刺激の距離関係（完全1度）	19
3.13	ヴィブラートの位相差に関する刺激の距離関係（短3度）	20
3.14	ヴィブラートの周波数差に関する刺激の距離関係（短3度）	20
4.1	実験環境の概要	23
4.2	各組の協和音程からのずれ	26
4.3	各組の発声タイミング	27

表 目 次

3.1	歌声に含まれる基本周波数の動的変動成分のパラメータ設定値（歌唱 A ／歌唱 B）	9
3.2	協和音程からのずれに関する評価結果	17
3.3	発声タイミングのずれに関する評価結果	17
3.4	協和音程からのずれと発声タイミングのずれに関する評価結果	18
3.5	ヴィブラートの位相差に関する評価結果（完全 1 度）	19
3.6	ヴィブラートの周波数差に関する評価結果（完全 1 度）	19
3.7	ヴィブラートの位相差に関する評価結果（短 3 度）	20
3.8	ヴィブラートの周波数差に関する評価結果（短 3 度）	20
4.1	各組の協和音程からのずれ（音程差）と発声タイミングのずれ（時間差）	25

第1章 序論

1.1 研究背景

音楽は言葉やしぐさと同様に人間の感情や想いを表現するためのコミュニケーション手段の一つであり、素晴らしい音楽は時として大きな感動を人々に与えることができる。プロの音楽家が演奏や作曲といった音楽行為を行う際はもちろん、誰しもが音楽行為に携わる際には音楽的な素晴らしさを強く意識し目指しているものである。では、我々人間は、如何にして素晴らしい音楽行為を行うことができ、また何処に音楽的な素晴らしさを感じているのだろうか。この「音楽的な素晴らしさとは何か」という問題は、音楽に関した多くの研究において根底をなす問題であり、この究明は究極的な目標である。

この解明に繋がるものとして、演奏の指導や練習を支援するのに有効なために、聴取者の主観である「好み」ととらわれない演奏の客観的な評価に関して様々な研究が行われて来ている。池田は、歌声の基本集周波数の時間的特性として音節間の無音区間の存在とビブラートの有無とその性質に着目し、音学歴の異なる歌唱者を対象とした音声分析を行っている [1]。片岡らは、歌声のピッチ、音長、音量に着目し、音学歴の異なる歌唱者を対象とした音声分析を行っている [2]。また、これらのような様々な知見を基に中野らは、発音、音程、音色、テクニクなど様々な音響特徴量により歌唱力の自動評価システムの構築を試みている [3]。このように独唱の客観的評価に関する研究が進んで来ている。

同様に、合奏・合唱といった共同演奏における客観的評価に関する研究も必要とされている。共同演奏において卓越した演奏となるには、演奏者間で相互に他者の演奏を聴き、自身の演奏を調節することによって複数の演奏が上手く合わさることが重要であり、またそれにより独奏・独唱とは異なる感動を与えることができる。そのため、共同演奏においては個別に見た演奏の評価はもちろん重要ではあるが、演奏者間での関係がより重要とされ、そこに着目した研究が行われている。山本らは、ピアノの共同演奏で2者間の小節リズム（小節の最初の音の発音時間間隔）と呼吸リズム（呼吸波形の吸気ピーク時間間隔）の時間差における同調度が曲の難易度によって変わることを示している [4]。Sungberg は、合唱団のバス部6人に即興的な和音進行の演奏であるカデンツを歌わせたところ歌唱者間の基本周波数比の標準偏差が10～16 centの間にあることを示している [5]。野田は、歌唱者間の基本周波数の関係に着目し、音楽歴の異なる歌唱者を対象とした合唱の音声分析を行っている [6]。これらのように共同演奏の客観的評価に関する研究もあるが未だ少なく、共同演奏における様々な音響特徴量と客観的評価の関係について十分な理解は得られていない。

共同演奏における様々な音響特徴量の中でも、演奏者間の基本周波数の関係は評価において特に重視される項目であると考えられ、これにより客観的評価である上手さに関する評価がどのような影響を受けるかを定量的に解明することは非常に有用である。

1.2 研究目的

以上のような背景から、本研究では、共同演奏における演奏者間の基本周波数の関係が上手さに関する評価に及ぼす影響の定量的な解明を目指す。扱う共同演奏の対象としては、楽器に比べ自在に基本周波数を調節でき、基本周波数にみた上手さにおいて大きな違いが現れると考えられる合唱とする。

手法としては、実際の人による合唱音声解析、評価し、特徴量と評価結果の関係を調査するといったことが考えられるが、実際の人による歌唱では細かな基本周波数の制御が不可能であり、合唱全体で一律の特徴量に制御することができず、また正確に意図した特徴量に制御することができない。そのため、そのような実際の人による合唱音声から、特徴量と評価の関係を明確に解明することは困難である。そこで、人工的に特徴量を様々な制御した合唱音声を作成し、それらを聴取実験により評価することで制御した特徴量と評価の関係を調査する。

また、音学歴の異なる歌唱者による実際の合唱の計測実験を行い、作成した合唱音声による評価結果の妥当性を検証する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章では、本研究の対象としている研究分野の背景を示し、本研究の位置づけと目的を示す。

第2章では、本研究の研究方針を示す。ここでは、本研究で用いる合唱音声の合成システムと着目する歌唱者間の基本周波数の特徴量について示し、特徴量が評価に及ぼす影響を如何にして明らかにしていくか述べる。

第3章では、特徴量を様々な制御した合唱音声を作成し、この合唱音声を用いた聴取実験により特徴量と評価の関係を調査する。

第4章では、実際の人による合唱の計測実験を行い、第3章での作成した合唱音声による評価結果の妥当性を検証する。

第5章では、本研究で得られた結果を要約し、今後の展望を述べる。

第2章 研究方針

2.1 はじめに

本章では，合唱での歌唱者間の基本周波数の特徴量が上手さに関する評価に及ぼす影響の解明に向けた方針を示す．はじめに，本研究で使用する自然性の高い歌声合成システムについて概略する．次に，本研究において着目する，歌唱者間の基本周波数の特徴量について示す．

2.2 合唱音声の合成システム

第1章で述べたように，実際の人による合唱から歌唱者間の基本周波数の特徴量と上手さに関する評価の関係を明確に解明することは困難なため，人工的に特徴量を様々に制御した合唱音声を合成し，それらを聴取実験により評価することで制御した特徴量と評価の関係を調査する．

合成した合唱音声によって実際の人による合唱の評価基準を得るには，より実際の人による歌唱に近い合成音声を用いる必要がある．実際の歌唱に近い合成音声を用いなければ，その合成音声によって得られた評価基準が実際の合唱においても対応するとは限らないからである．そこで，合唱音声の合成には，高品質な音声分析合成システム STRAIGHT[7]を基盤に，齋藤によって開発された自然性の高い歌声合成システム [8]を用いる．

まず，STRAIGHT とは音声の生成過程に基づき，声帯振動情報の基本周波数と，制動形状情報のスペクトルを抽出し，これらを用いて音声を合成するボコーダ型のシステムで，高精度な音声分析，自由な音響パラメータ操作，高品質な音声合成を可能としている．図 2.1 に示す齋藤のシステムでは，この STRAIGHT の分析・合成過程において，基本周波数，スペクトル，音韻長の制御を行い，様々な知見により明らかになっている歌声に含まれる特有の特徴成分を制御することで自然性の高い歌声を合成可能としている．齋藤は歌声知覚に最も大きな影響を与えている音響特徴量は，基本周波数の動的な変動成分であることを示している．

本研究では，下記に示すこの基本周波数の動的変動成分の制御を行った．

- メロディ成分 (Melody Component)
譜面上から作成される，矩形的なメロディ変化

- オーバーシュート (Overshoot)
音高変化時の傾斜を持った滑らかな変化と目的音の音高を超えて振れる瞬時的な振動成分
- プレパレーション (Preparation)
音高が変化する直前に変化とは逆の方向に振れる瞬時的な振動成分
- ヴィブラート (Vibrato)
同一音高区間での 4~7 Hz の周期的な振動成分
- 微細変動成分 (Fine-fluctuation)
発声区間全体に含まれる不規則で細かい振動成分

図 2.2 に制御した基本周波数の時間変動を示す. また, これらの変動成分の制御システムは, メロディ成分に対して他の 4 つの変動成分を付加する形をとっている. オーバーシュートとプレパレーションとヴィブラートは次式の制動 2 次系伝達関数のインパルス応答として与えられるフィルタにメロディ成分を通すことで制御される.

$$H(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\Omega s + \Omega^2} \quad (2.1)$$

ここで, Ω は固有角周波数, ζ は減衰項, K は振幅項であり, これらのパラメータ値により各変動成分の特性が決まる.

オーバーシュートとプレパレーションは次式の減衰振動モデル ($|\zeta| < 1$) で記述される.

$$h_1(t) = \frac{K}{\sqrt{1-\zeta^2}} \exp(-\zeta\Omega t) \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\Omega t) \quad (2.2)$$

ヴィブラートは次式の定常振動モデル ($|\zeta| = 0$) で記述される.

$$h_2(t) = \frac{K}{\Omega} \sin(\Omega t) \quad (2.3)$$

微細変動は白色雑音をカットオフ周波数 10 Hz のローパスフィルタに通し, 最大振幅が 10 cent になるように正規化したものを基本周波数全体に付加することで表現される.

ここで, cent とは 2 音間の基本周波数の隔たりを比率によって理論的に表したもので次式で与えられる.

$$f_1 : f_2 = 1 : 2^{cent/1200} \quad (2.4)$$

$$cent = \left\lceil 1200 \log_2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \right\rceil \quad (2.5)$$

1 オクターブを均等に 12 等分した音律である十二平均律において, 1 オクターブは 1200 cent, 半音は 100 cent となる.

なお、このシステムによって個別に歌声を合成し、足し合わせることで合唱音声を作成する。

2.3 合唱での評価に影響を及ぼす基本周波数の特徴量

本研究では、評価に影響を及ぼすと考えられる歌唱者間の基本周波数の基礎的な特徴量として以下のものに着目した。

- 協和音程となる基本周波数の整数比からのずれ
高さの異なる複数の音が同時に響く和音において、基本周波数が単純な整数比となる場合、共通した倍音を多く含むため、協和した心地よい音程となる。完全純正律はこのこと対応し、協和する音の組が多く存在する音律であり、この音律の協和音程からずれに着目する。
- 各音の発声タイミングのずれ
歌唱者間の各音の発声タイミングのずれに着目する。
- ヴィブラートの位相差と周波数差
周期的な振動成分であるヴィブラートにおいて、歌唱者間での位相差および周波数差に着目する。

これらの特徴量の差異より評価が異なってくると考えられ、前述した合成システムの基本周波数の制御において、足し合わせる歌声間でずれを持たせることでこれらの特徴量を制御した合唱音声を合成する。そして、様々な特徴量を制御した合唱音声を聴取実験により評価することで制御した特徴量と評価の関係を調査していく。

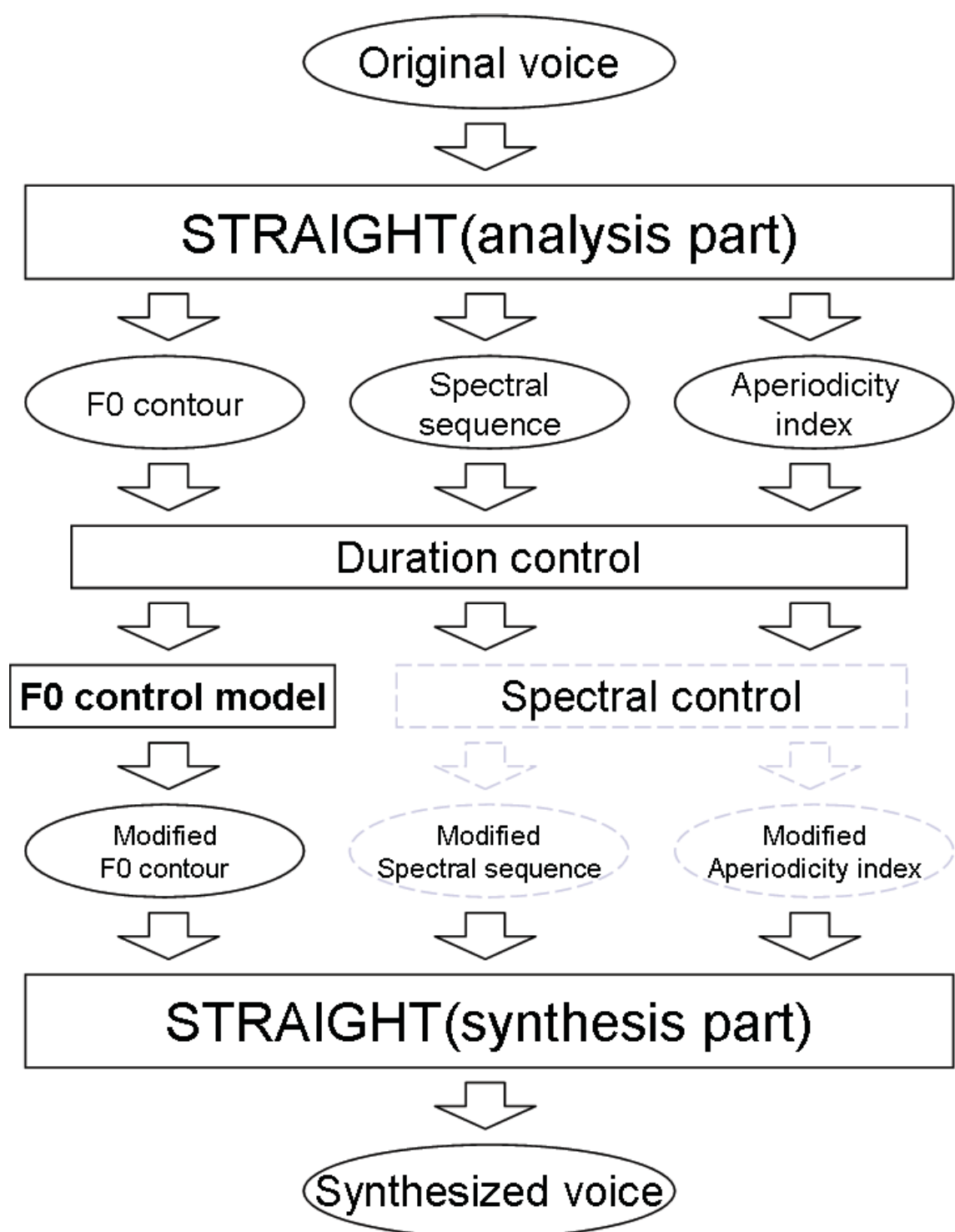


図 2.1: 合成システム

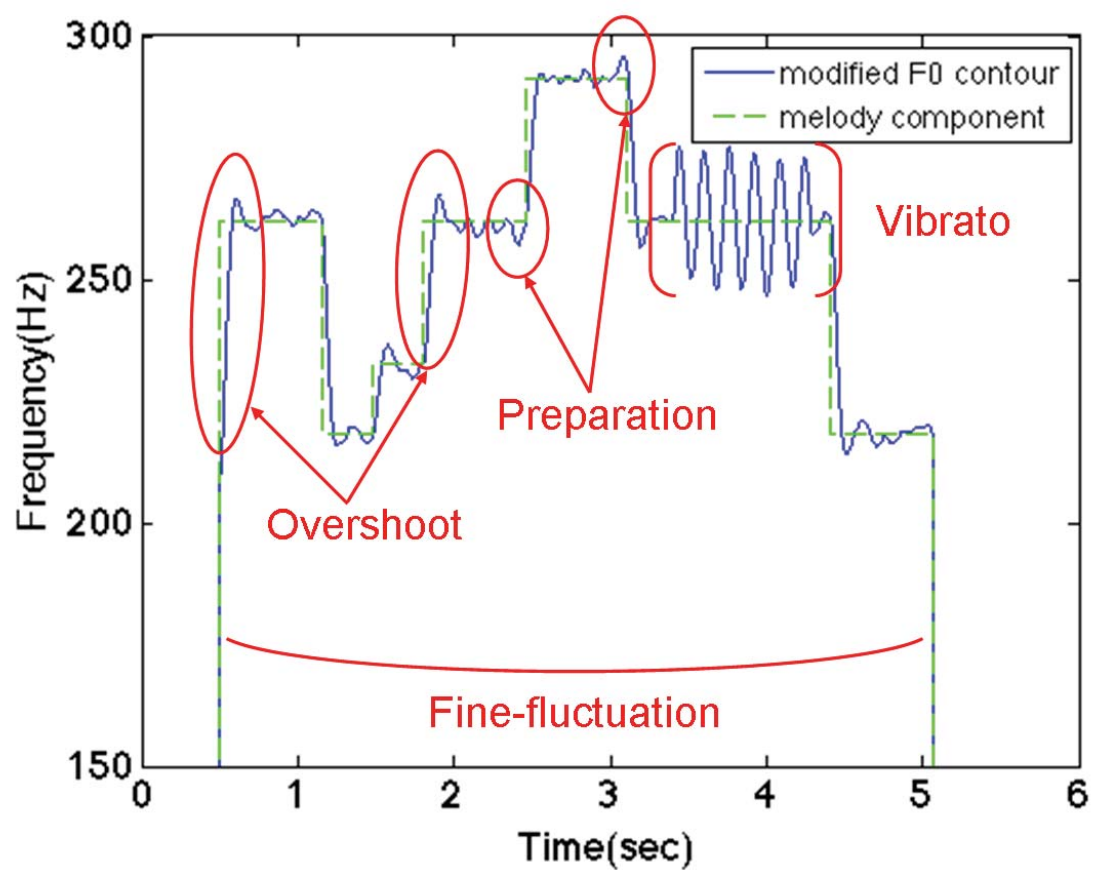


図 2.2: 歌声に含まれる基本周波数の動的変動成分

第3章 合唱音声の評価実験

3.1 はじめに

本章では、本研究において着目した基本周波数の特徴量の差異により評価がどのように異なるかを、特徴量を様々に制御した合唱音声の評価実験により調査する。はじめに、合成した合唱音声の詳細について示し、次に、評価実験の内容と結果について示す。

3.2 特徴量を制御した合唱音声の詳細

前述した特徴量による評価への影響を見るために合成した、2名の歌唱による合唱音声について示す。合唱音声の個別の歌声の合成には、基本周波数の情報であるメロディ成分とスペクトルの情報が必要である。

メロディ成分においては、協和音程からのずれと発声タイミングのずれによる評価への影響を見るために合成した合唱音声では、図 3.1 に示す童謡「紅葉」の 9～12 小節目を用い、全 16 音からなる上下 2 パートとした。図 3.2 に物理的な時間変動の様子も合わせて示す。ヴィブラートの位相差と周波数差による評価の影響を見るために合成した合唱音声では、4ms 長の完全 1 度および短 3 度のロングトーンとした。

スペクトルの情報においては、まず 2 名の健常話者による日本語母音/a/のロングトーンをマイクロホン (Brüel & Kjær 4192-L-001) とアンプ (Brüel & Kjær 2691-A-0S2) に通し、サンプリング周波数 44.1 kHz、量子化ビット 16 bit でレコーダー (EDIROL R-4) に収録し、次に STRAIGHT による抽出を行い、メロディ成分の時間長に合わせスペクトルの先頭から切り出したものを使用した。

特徴量ごとに合成した合唱音声の詳細な制御方法については以下の通りである。

- 協和音程からのずれを制御した合唱音声
図 3.3 に示すように、メロディ成分において上下パートの満たすべき協和音程から、下のパートの基本周波数全体を 0～40cent まで 10cent 毎に下方にシフトした。
- 発声タイミングのずれを制御した合唱音声
図 3.4 に示すように、メロディ成分において上パートに対する下パート全体のタイミングを、0～80ms まで 20ms 毎に遅らせた。ただし、片方のパートのみが歌唱している区間がないように調整した。

- ヴィブラートの位相差を制御した合唱音声
図 3.5 に示すように，ヴィブラートの位相差を $0 \sim \pi$ まで 0.25π 毎に制御した．なお，ヴィブラートの周波数は 6.25 Hz，振幅は音高の 5.2 % (88 cent) に固定した．
- ヴィブラートの周波数差を制御した合唱音声
図 3.6 に示すように，ヴィブラートの周波数差を $0 \sim 2$ Hz まで 0.5 Hz 毎に制御した．これは，一方の周波数を 6.25 Hz に固定したのに対し，もう一方を 4.25～6.25 Hz と変動させることにより行った．なお，振幅は音高の 5.2 % (88 cent) に固定した．

なお，ヴィブラート以外の歌声に含まれる基本周波数の動的変動成分の制御では，より自然な合唱となるよう 2 名の歌唱でまったく同じ制御を行わず，オーバーシュートとプレパレーションについては齋藤の研究において歌声のデータセットから抽出したパラメータを参考に，表 3.1 に示すように異なるパラメータを設定した．微細変動成分については，異なる白色雑音を用いて制御した．

また，協和音程からのずれと発声タイミングのずれを制御した合唱音声では，ヴィブラートのずれにより評価に影響が出ると考えられたため，ヴィブラートを付加しない合唱音声とした．

表 3.1: 歌声に含まれる基本周波数の動的変動成分のパラメータ設定値（歌唱 A / 歌唱 B）

F0 fluctuation	Ω [rad/ms]	ζ	K
overshoot	0.0363/0.0312	0.5701/0.5183	0.0363/0.0312
preparation	0.0308/0.0287	0.6746/0.6604	0.0308/0.0287



図 3.1: 使用した童謡「紅葉」の譜面

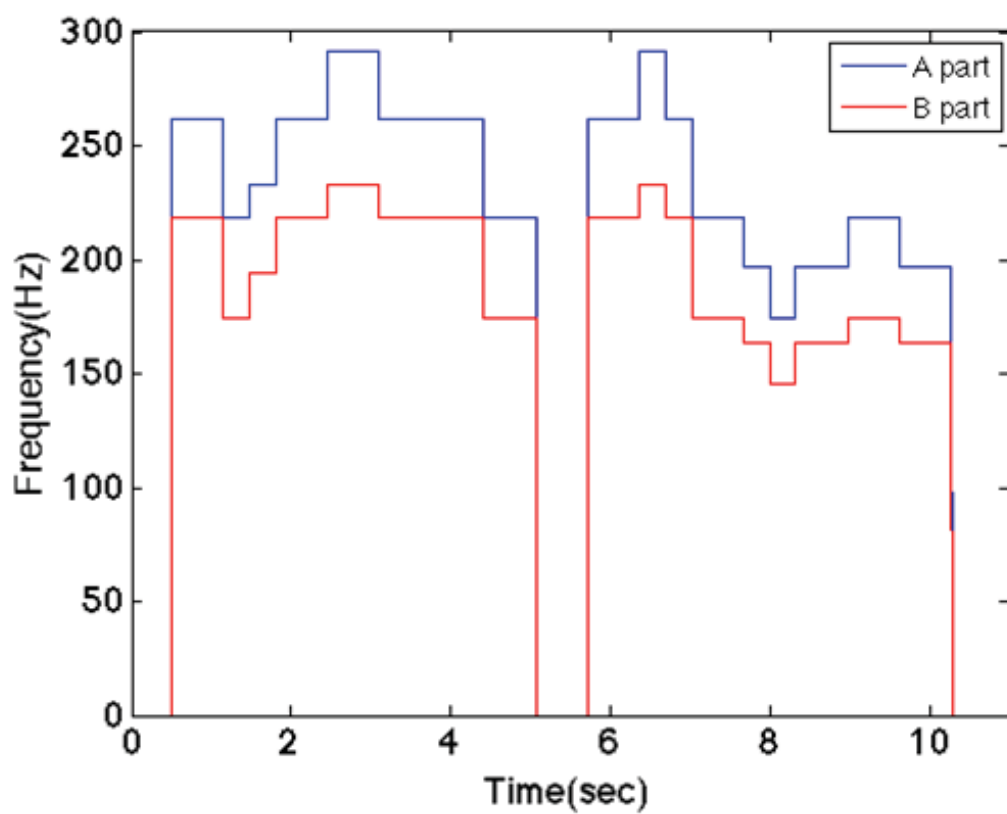


図 3.2: 童謡「紅葉」の2パートの時間変動

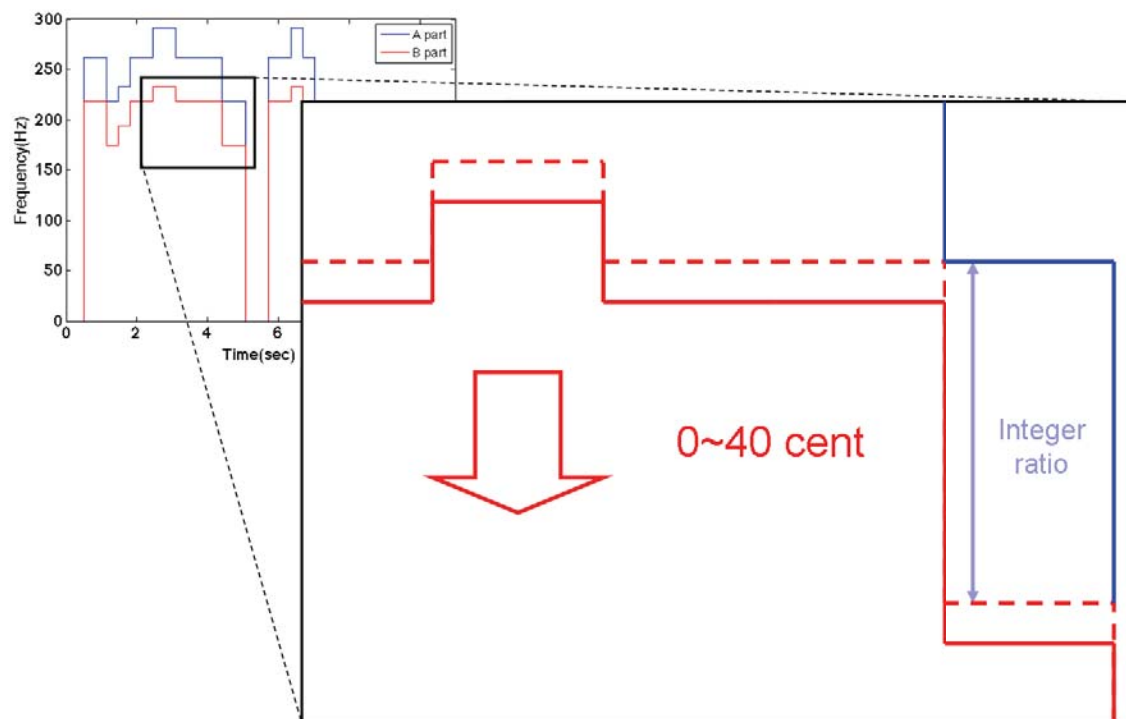


図 3.3: 協和音程からのずれの制御

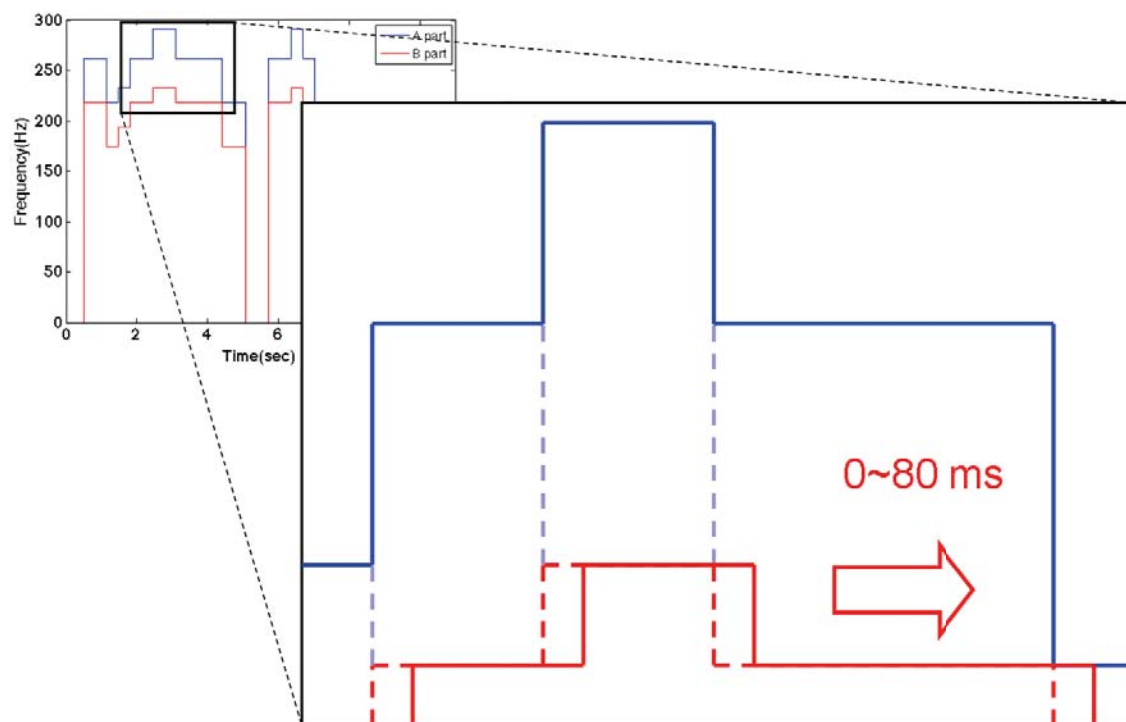


図 3.4: 発声タイミングのずれの制御

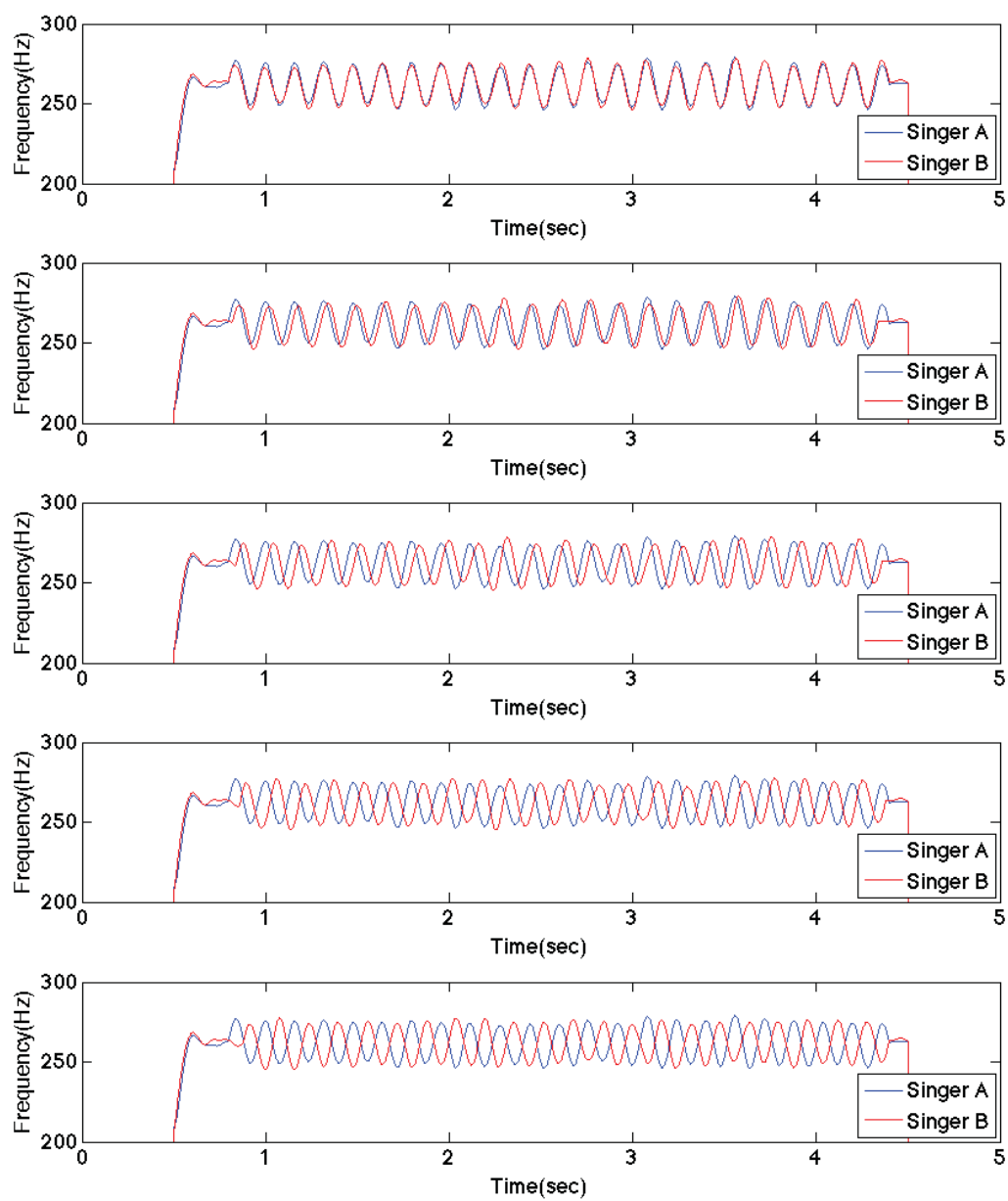


図 3.5: ヴィブラートの位相差の制御 (完全1度)

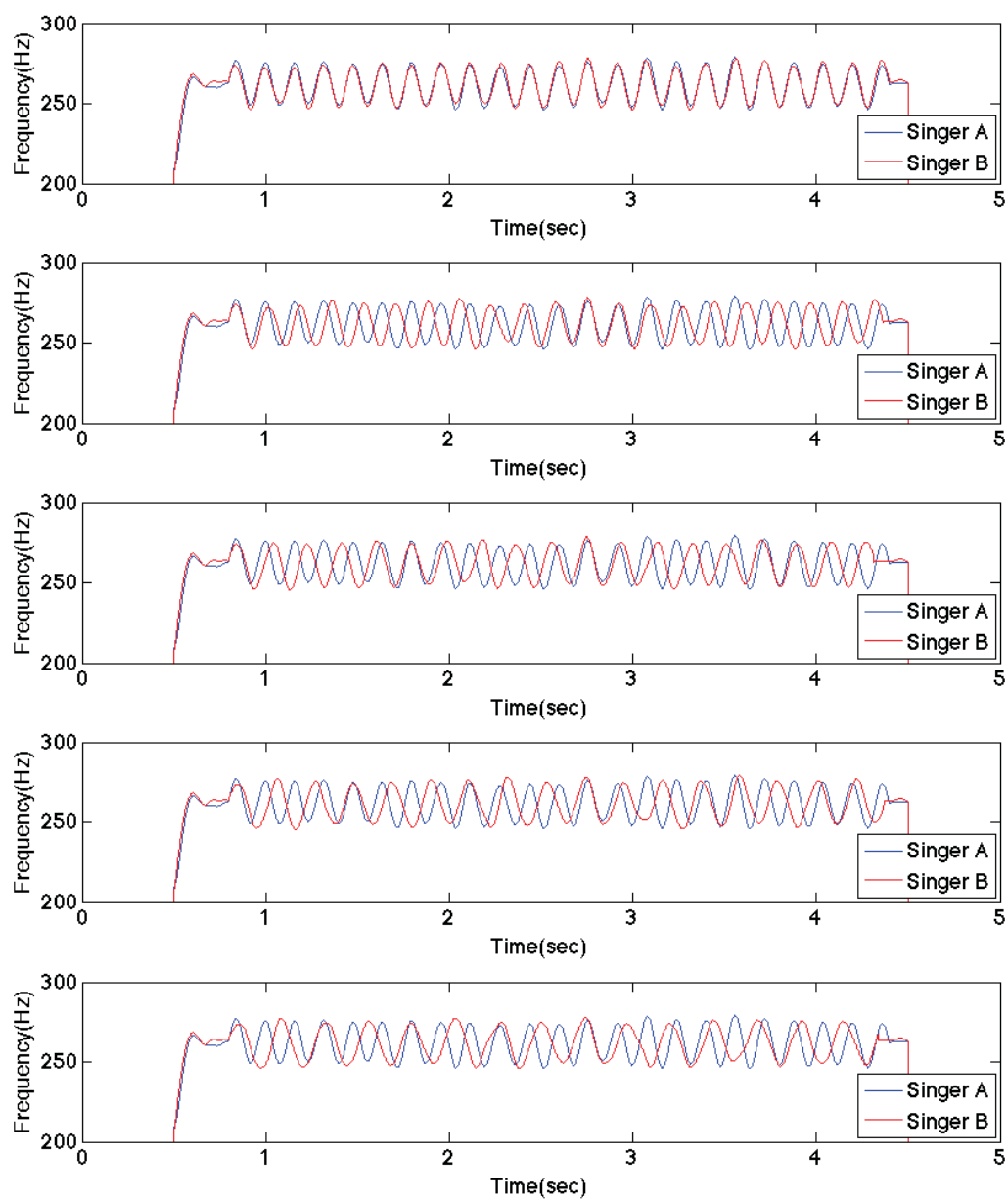


図 3.6: ヴィブラートの周波数差の制御 (完全1度)

3.3 聴取実験

前述の特微量を制御し合成した合唱音声において，種別にシェッフェの一対比較法（中屋変法）[9] による評価実験を行った．また，協和音程にからのずれと発声タイミングのずれにおいて，どちらのほうの評価に大きく影響しているかを見るために，両方の特微量を制御した合唱音声を合わせて評価する実験も行った．

一対比較法は，刺激を2つずつの対にして判断を求め序数尺度を得る方法で，被験者にとって判断が比較的易しく信頼性の高いものである．シェッフェの一対比較法では，評価点によって判断することで相対的な間隔尺度を得ることができる方法で，多くの被験者を必要としない利点がある．以下に聴取実験の詳細について示す．

実験手順

被験者には次のような教示を与え，合唱の上手さに関して評価してもらった．

刺激は任意のタイミングで聴取でき，また判断の往復を許し任意の回数聴取できるものとした．なお，評価の前に比較する全刺激を聴取することで評価の目安を付けてもらった．

2つの合唱を対 AB として複数組聴いてもらいます．

A と B の合唱を聴き比べてどちらのほうが合唱のほうが上手く聴こえるかを，下に記した5段階の評価尺度（図 3.7）に従って判断してください．

A の合唱のほうがより上手く聴こえたら正の値（1～2）に，B の合唱のほうがより上手く聴こえたら負の値（-2～-1）にと当てはまる値にチェックをしてください．

どちらも同程度と判断した場合は 0 を選択してください．

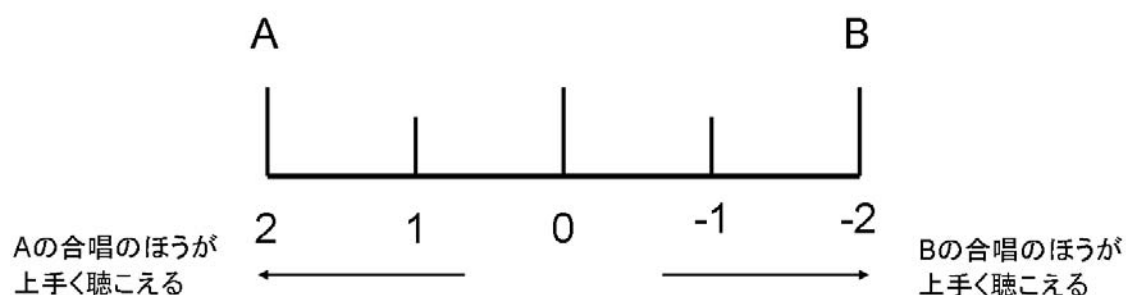


図 3.7: シェッフェの一対比較実験で用いた合唱の上手さに関する5段階評価尺度

被験者

20代男性7名．（ただし，専門的な音楽経験なし）

実験環境

実験は、PC (APPLE A1181) より出力されヘッドホン (SENNHEISER HD280) を介して両耳受聴で行った。

3.4 結果考察

上記の実験方法で得られデータを処理し母数を推定した結果と F 検定による刺激間の有意差検定を 5 % 水準で行った結果を表 3.2～3.8 に合わせて示す。また、母数の値に従って、相対的な間隔尺度を直線上で示したものが図 3.8～3.14 である。

協和音程からのずれに関する結果では、協和音程からのずれが大きくなるにつれ評価が落ちており定性的で規則的なものとなっている。評価の落ちる条件に着目してみると、特に 30 cent と 40 cent の間で比較的大きく評価が落ちており有意差も確認できるため、この区間が評価を大別する一つの基準となっていることが示唆できる。また、10 cent と 20 cent の間で比較的大きく評価が落ちており有意差も確認できるため、この区間もまた評価を分ける一つの基準となっている可能性が示唆できる。

発声タイミングのずれに関する結果では、発声タイミングのずれが大きくなるにつれ評価が落ちており定性的で規則的なものとなっている。評価の落ちる条件に着目してみると、特に 40 ms と 60 ms の間で比較的大きく評価が落ちており有意差も確認できるため、この区間が評価を大別する一つの基準となっていることが示唆できる。また、0 ms または 20 ms と 40 ms の間で比較的大きく評価が落ちており、20 ms と 40 ms においては有意差も確認できるため、この区間もまた評価を分ける一つの基準となっている可能性が示唆できる。

協和音程からのずれと発声タイミングのずれにおいて、どちらのほうの評価に大きく影響しているかを見るために、前述の結果でそれぞれ大きく評価の落ちる境界となっている付近の特徴量を持った合唱音声を含わせて評価した結果では、協和音程からのずれにおいて大きく評価を落とす境界となっている 30, 40 cent のずれを持った合唱音声の方が、発声タイミングのずれにおいて大きく評価を落とす境界となっている 40, 60 ms のずれを持った合唱音声より評価が低くなっている。このため、発声タイミングのずれより協和音程からのずれのほうが評価に大きく影響している可能性が示唆される。

完全 1 度の場合のヴィブラートの位相差に関する結果では、位相差が 0.25π の合唱音声を除いてヴィブラートの位相差が大きくなるにつれ評価が落ちており定性的で規則的なものとなっていることが伺えるが、位相差が 0.25π の合唱音声の方が位相差が 0 の合唱音声より良い評価となっている。これは、ヴィブラートがほとんど重なっている合唱音声は自然なものの聴こえず、若干のずれがあるものの方が自然に聴こえたという可能性があり、その影響によるものではないかと推測される。そこで、位相差が 0 の合唱音声を除き評価の落ちる条件に着目してみると、 0.25π と 0.5π の間で比較的大きく評価が落ちており有意差も確認できるため、この区間が評価を大別する一つの基準となっていることが示唆できる。

完全1度の場合のヴィブラートの周波数差に関する結果では、ほぼヴィブラートの周波数差が大きくなるにつれ評価が落ちており定性的で規則的なものとなっている。評価の落ちる条件に着目してみると、0 Hz と 0.5 Hz の間で比較的大きく評価が落ちており、この区間が評価を大別する一つの基準となっていることが示唆できるが、0.5 Hz のずれだけでも評価が大きく分かれているため、それ以上の周波数差はあまり現実的ではないのかもしれない。そのため、0.5 Hz 付近でのより詳細な調査が必要であると考察される。

短3度の場合のヴィブラートの位相差に関する結果では、ヴィブラートの位相差が大きくなるにつれ評価が落ちており定性的で規則的なものとなっているが、完全1度の場合に比べ全体的に評価の差は小さくなっている。評価の落ちる条件に着目してみると、有意差は確認できないまでも、完全1度の場合と同様に 0.25π と 0.5π の間で比較的大きく評価が落ちており、この区間が評価を大別する一つの基準となっていることが示唆できる。

短3度の場合のヴィブラートの周波数差に関する結果では、ヴィブラートの周波数差が大きくなるにつれ評価が落ちており定性的で規則的なものとなっているが、完全1度の場合に比べ全体的に評価の差は小さくなっている。評価の落ちる条件に着目してみると、有意差は確認できないまでも、完全1度の場合と同様に 0 Hz と 0.5 Hz の間で比較的大きく評価が落ちており、同様の考察ができる。

ヴィブラートに関する結果を包括的に見ると、位相差と周波数のどちらにおいても、完全1度と短3度のどちらの場合でも同じ刺激間で大きく評価が落ちており、音程が異なってもその区間が評価を大別する一つの基準となっていることが示唆できる。また、位相差と周波数のどちらにおいても、短3度の場合よりも完全1度の場合の方が評価の違いが顕著に出ているため、歌唱間の基本周波数が近い音程なほどヴィブラートのずれを知覚し易い可能性がある。このことは、協和音程からのずれや発声タイミングのずれの場合においても同様に言えるかもしれない。

表 3.2: 協和音程からのずれに関する評価結果

合唱音声	母数	
0cent	0.57	有意差が確認された対
10cent	0.40	(0, 20) (0, 30) (0, 40)
20cent	-0.06	(10, 20) (10, 30) (10, 40)
30cent	-0.11	(20, 40) (30, 40)
40cent	-0.80	

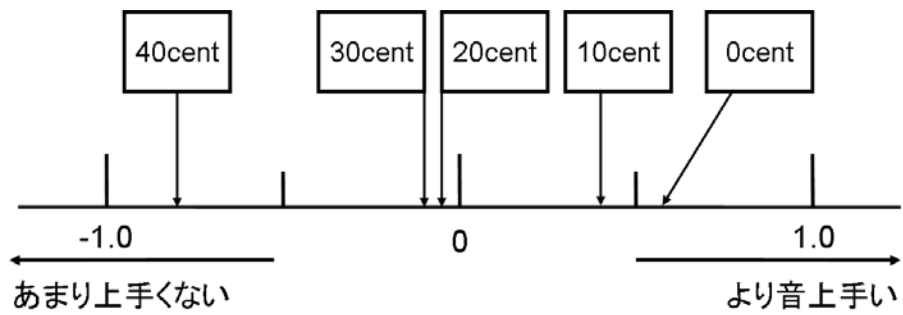


図 3.8: 協和音程からのずれに関する刺激の距離関係

表 3.3: 発声タイミングのずれに関する評価結果

合唱音声	母数	
0ms	0.63	有意差が確認された対
20ms	0.66	(0, 60) (0, 80)
40ms	0.14	(20, 40) (20, 60) (20, 80)
60ms	-0.51	(40, 60) (40, 80)
80ms	-0.91	

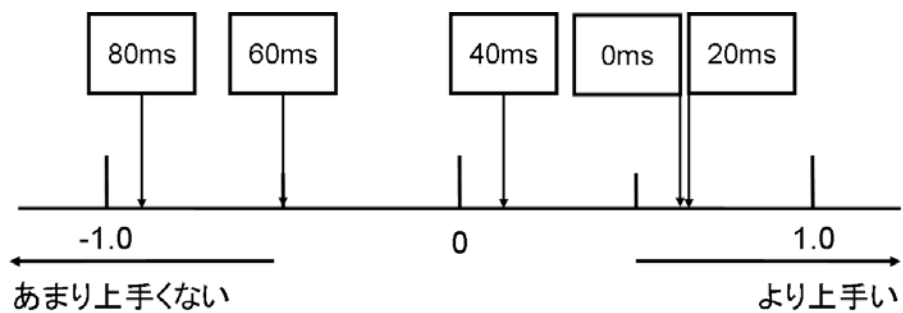


図 3.9: 発声タイミングのずれに関する刺激の距離関係

表 3.4: 協和音程からのずれと発声タイミングのずれに関する評価結果

合唱音声	母数	
20ms	0.79	有意差が確認されなかった対 (20ms, 40ms) (40ms, 20cent) (60ms, 30cent)
40ms	0.45	
60ms	-0.14	
20cent	0.10	
40cent	-0.36	
60cent	-0.83	

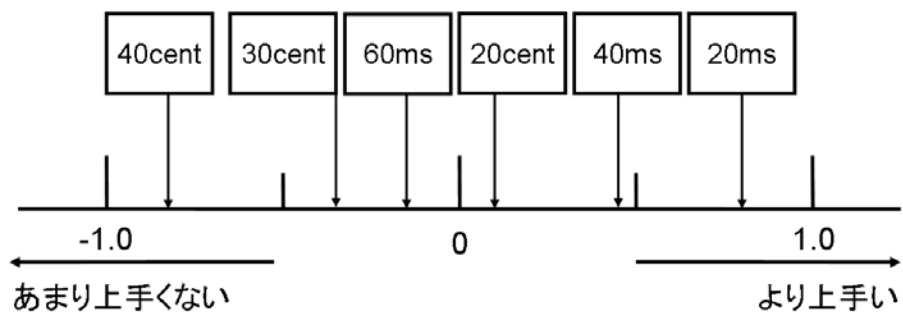


図 3.10: 協和音程からのずれと発声タイミングのずれに関する刺激の距離関係

表 3.5: ヴィブラートの位相差に関する評価結果（完全1度）

合成音声	母数	
0	0.26	有意差が確認された対 (0, 0.75 π) (0, π) (0.25 π , 0.5 π) (0.25 π , 0.75 π) (0.25 π , π)
0.25 π	0.66	
0.5 π	-0.03	
0.75 π	-0.34	
π	-0.57	

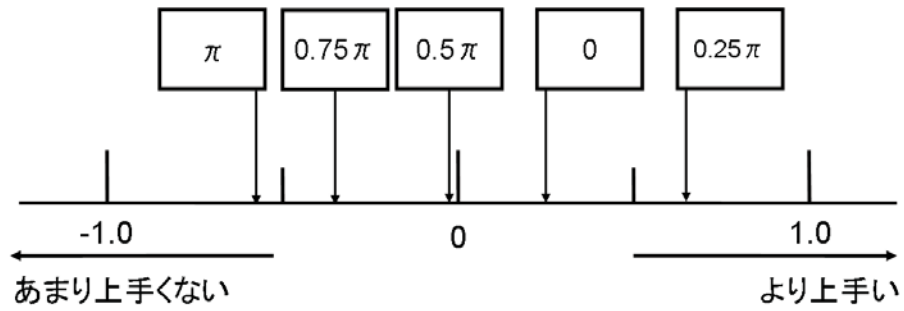


図 3.11: ヴィブラートの位相差に関する刺激の距離関係（完全1度）

表 3.6: ヴィブラートの周波数差に関する評価結果（完全1度）

合成音声	母数	
0Hz	0.80	有意差が確認された対 (0, 0.5) (0, 1.0) (0, 1.5) (0, 2.0) (0.5, 2.0)
0.5Hz	0.20	
1Hz	-0.26	
1.5Hz	-0.17	
2Hz	-0.57	

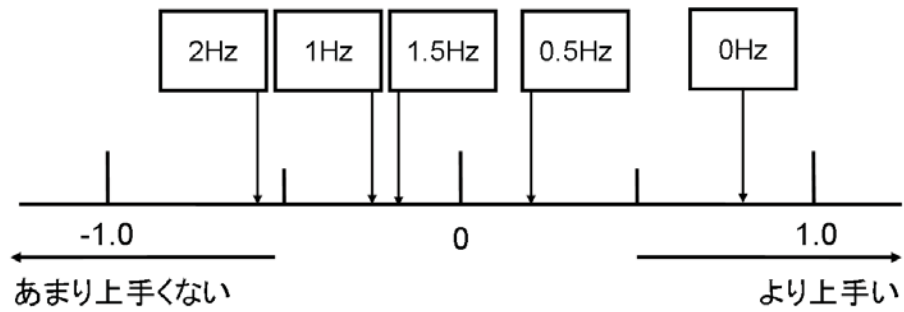


図 3.12: ヴィブラートの周波数差に関する刺激の距離関係（完全1度）

表 3.7: ヴィブラートの位相差に関する評価結果（短3度）

合成音声	母数	
0	0.40	有意差が確認された対 $(0, 0.75\pi)$ $(0, \pi)$
0.25π	0.28	
0.5π	-0.11	
0.75π	-0.29	
π	-0.23	

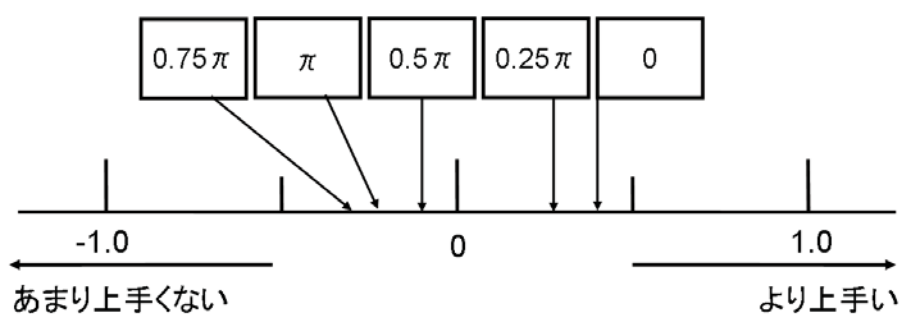


図 3.13: ヴィブラートの位相差に関する刺激の距離関係（短3度）

表 3.8: ヴィブラートの周波数差に関する評価結果（短3度）

合成音声	母数	
0Hz	-0.43	有意差が確認された対 $(0, 1.5)$ $(0, 2.0)$
0.5Hz	-0.17	
1Hz	-0.09	
1.5Hz	0.14	
2Hz	0.54	

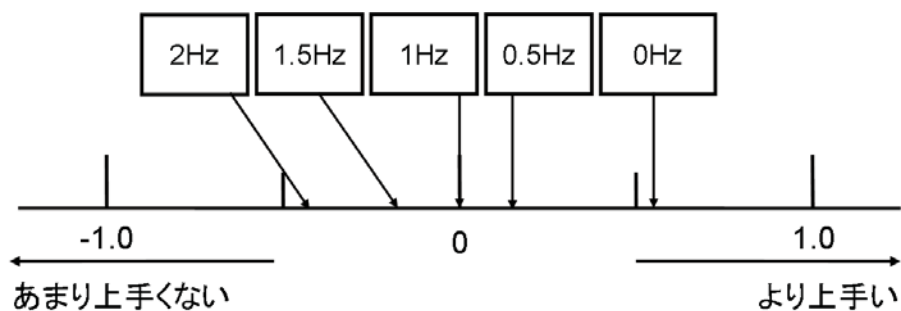


図 3.14: ヴィブラートの周波数差に関する刺激の距離関係（短3度）

3.5 まとめ

本章では，本研究において着目した基本周波数の特徴量の差異により評価がどのように異なるかを，特徴量を様々に制御した合唱音声を作成し，それらの評価の相対的な間隔尺度を得ることができる聴取実験により調査した．その結果，特に評価の落ちる条件に着目することで以下のことを示唆した．

協和音程からのずれを制御した合唱音声と発声タイミングのずれを制御した合唱音声による評価結果からは，それぞれ 30 cent と 40 cent，40 ms と 60 ms の間で大きく評価が落ちていたため，この区間が評価を大別する一つの基準となっていることを示唆した．

また，協和音程からのずれと発声タイミングのずれにおいて，どちらのほうの評価に大きく影響しているかを見るために，それぞれの特徴量を制御した合唱音声を合わせて評価した結果からは，協和音程からのずれにおいて大きく評価を落とす境界となっている 30, 40 cent のずれを持った合唱音声の方が，発声タイミングのずれにおいて大きく評価を落とす境界となっている 40, 60 ms のずれを持った合唱音声より評価が低くなっていた．このため，発声タイミングのずれより協和音程からのずれのほうが評価に大きく影響している可能性を示唆した．

ヴィブラートの位相差を制御した合唱音声と周波数差を制御した合唱音声による評価結果からは，それぞれ完全 1 度と短 3 度のどちらの場合でも 0.25π と 0.5π ，0 Hz と 0.5 Hz の間で大きく評価が落ちており，この区間が評価を大別する一つの基準となっていることを示唆した．

第4章 合唱実験

4.1 はじめに

前章では合成した合唱音声の評価結果により，評価の基準となりえるものを得ることができた．本章では，その妥当性を検証するために，実際の人による合唱として音楽経験に差あるグループ間での合唱を計測することで調査する．

4.2 実験条件

実験条件を下記に示す．

被験者

- グループ1：専門的な音楽経験を有し学生合唱団に所属する20歳前後の日本人男性3名（A,B,C），女性2名（D,E）．各被験者の音学歴を下記に示す．
 - － 被験者A：合唱歴9ヶ月．
 - － 被験者B：合唱歴1年．
 - － 被験者C：合唱歴3年．
 - － 被験者D：合唱歴9年．
 - － 被験者E：合唱歴4年．
- グループ2：専門的な音楽経験のない20代の日本人男性3名（F,G,H）

発声内容

前章において用いた同様の楽曲である童謡「紅葉」の9～12小節目の上下パートの，日本語母音/a/のみによる歌唱．

実験手順

各グループ内で2名1組となり歌い易いよう自由にパートに分かれ，楽譜又は聴取実験において合成したずれの無い合唱音声を提示し数回練習した後，2回分の合唱を収録．

実験環境

実験は図 4.1 に示すように、Laryngograph を用い歌唱者の声帯振動を電気信号である EGG (Electroglotto-graph) 信号として、サンプリング周波数 44.1 kHz、量子化ビット 16 bit でレコーダー (EDIROL R-4) に収録.

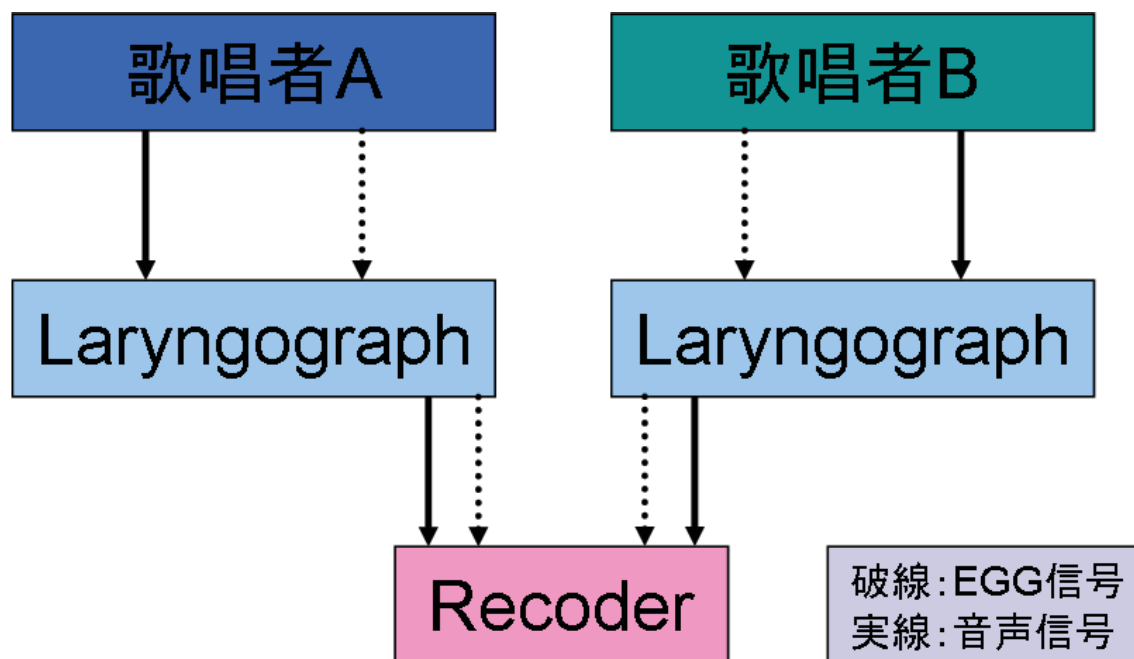


図 4.1: 実験環境の概要

4.3 解析手法

収録した実際の人による合唱での協和音程からのずれと発声タイミングのずれの解析手法を以下に示す．解析に必要となる基本周波数の時間変動は収録した EGG 信号から STRAIGHT により抽出した．

協和音程からのずれの解析では，矩形窓（窓幅：150 ms，シフト幅：10 ms）を用い，Sundberg と野田による解析に基づき枠内での標準偏差が 15 cent 以下になる区間を各音の安定発声区間とし，2 名の歌唱の同時刻での安定発声区間について，サンプリング点ごとに協和音程からのずれを求め区間長の平均を取った．

発声タイミングのずれの解析では，同様の窓を用い，枠内前半と後半の平均の周波数比が 50 cent 以上となる点を音の変化点とし，2 者間でのこの変化点のずれを発声タイミングのずれとして求めた．

なお，ヴィブラートに関しては今回の収録での使用は見られなかったため解析していない．

4.4 結果考察

協和音程からのずれと発声タイミングのずれを，それぞれ全 16 音において求め，その平均と標準偏差を求めたものを表 4.1 と，図 4.2，4.3 に示す．

協和音程からのずれにおいては，合唱団に所属する被験者による合唱のすべてが，専門的な音楽経験のない被験者による合唱よりもずれの少ない結果となっている．また，合成した合唱音声の評価実験により得られた評価を大別する基準である 30 cent と 40 cent の間で，この 2 つのグループの合唱を大別できていることが伺える．

発声タイミングのずれにおいては，合唱団に所属する被験者による合唱の方が，専門的な音楽経験のない被験者による合唱よりも比較的ずれの少ない結果となっていることが伺える．また，合成した合唱音声の評価実験により得られた評価を大別する基準である 40 ms と 60 ms の間で，この 2 つのグループの合唱を概ね大別できている．

さらに，協和音程からのずれにおいては，2 つのグループ間で明確な差があるのに対して，発声タイミングのずれにおいては，専門的な音楽経験のない被験者による合唱が合唱団に所属する被験者による合唱と同程度の場合も多く見られ，2 つのグループ間で差が出づらくなっている．つまり，音楽経験の差は発声タイミングのずれよりも協和音程からのずれにおいて顕著に現れており，合成した合唱音声による評価実験の場合と同様に発声タイミングのずれよりも協和音程からのずれの方が評価に大きく影響している可能性が示唆される．

以上のように，合成した合唱音声の評価実験より得られた評価基準が，実際の人による合唱においても概ね対応していることが確認できた．

表 4.1: 各組の協和音程からのずれ（音程差）と発声タイミングのずれ（時間差）

被験者	回		平均	標準偏差
AB	1	音程差	21.5	13.0
		時間差	26.9	16.2
	2	音程差	31.0	23.5
		時間差	34.2	27.9
AC	1	音程差	23.5	17.4
		時間差	38.2	26.7
	2	音程差	18.9	10.5
		時間差	36.9	21.5
BC	1	音程差	29.1	20.0
		時間差	36.4	22.8
	2	音程差	39.4	30.7
		時間差	48.0	35.1
DE	1	音程差	16.1	4.7
		時間差	39.3	16.5
	2	音程差	17.5	6.7
		時間差	31.4	17.5
FG	1	音程差	52.6	22.6
		時間差	31.4	23.6
	2	音程差	47.2	35.7
		時間差	57.1	33.4
FH	1	音程差	52.1	37.3
		時間差	55.7	35.0
	2	音程差	47.9	28.4
		時間差	53.6	36.8
GH	1	音程差	45.3	19.9
		時間差	30.0	17.3
	2	音程差	49.1	23.9
		時間差	34.3	23.9

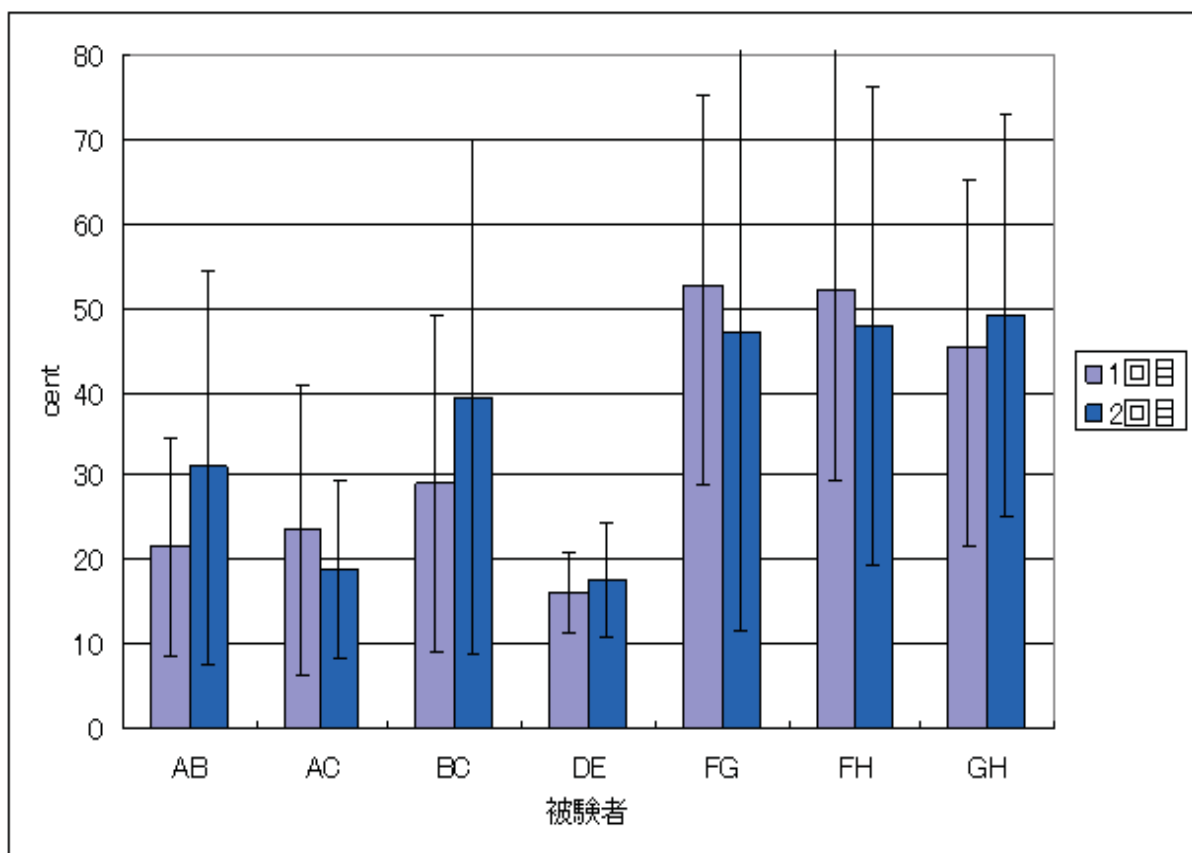


図 4.2: 各組の協和音程からのずれ

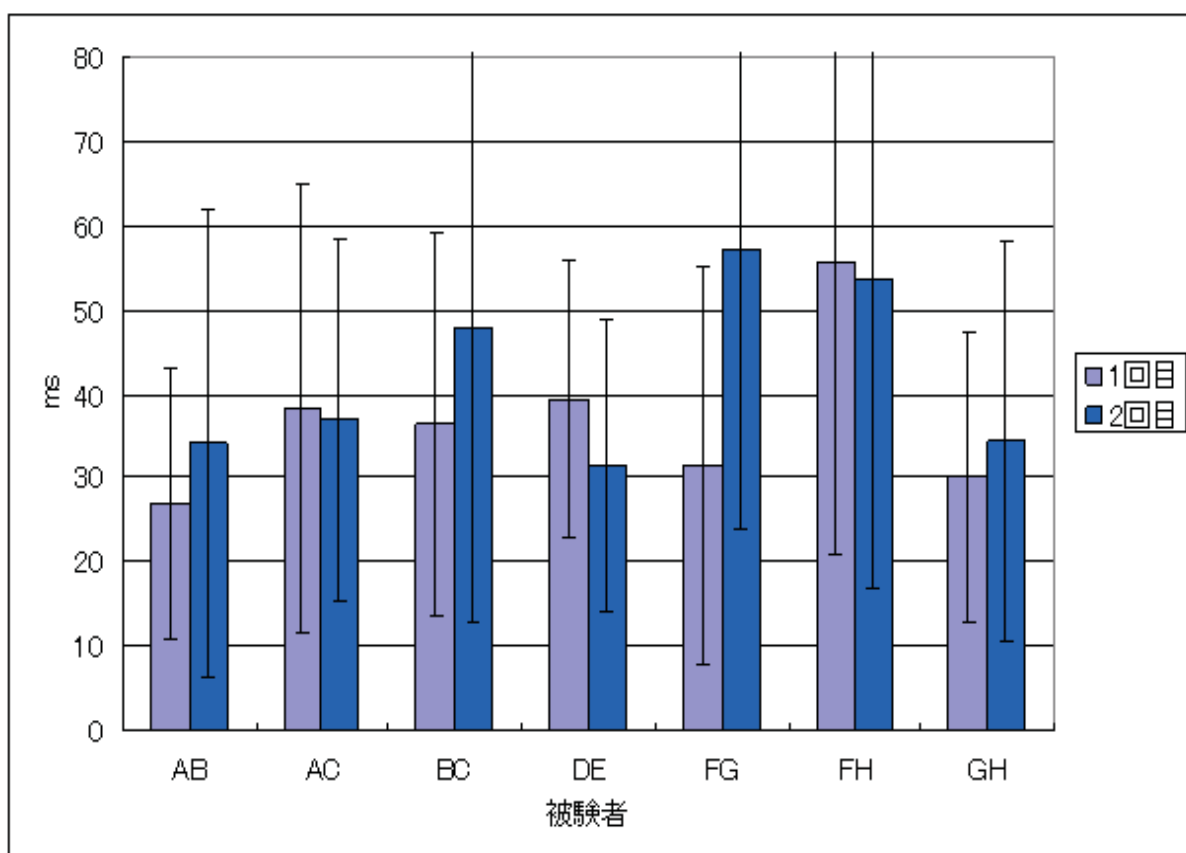


図 4.3: 各組の発声タイミング

4.5 まとめ

本章では，合成した合唱音声の評価実験により得られた評価基準の妥当性を検証するため，実際の人による合唱として音楽経験に差あるグループ間での合唱を計測することで調査した．その結果，協和音程からのずれと発声タイミングのずれのそれぞれにおいて評価を大別する基準となる 30 cent と 40 cent，40 ms と 60 ms の区間と，発声タイミングのずれよりも協和音程からのずれの方が評価に大きく影響することが，実際の人による合唱においても概ね対応していることが確認できた．

第5章 結論

5.1 本論文で明らかになったことの要約

本研究では、合唱での歌唱者間の基本周波数の特徴量が上手さに関する評価に及ぼす影響の定量的な解明を目指し、特徴量を様々に制御した合唱音声を合成し評価実験を行った。合唱での評価に影響を及ぼす基本周波数の特徴量として、協和音程からのずれ、発声タイミングのずれ、ヴィブラートの位相差と周波数差に着目し調査した結果、協和音程からのずれと発声タイミングのずれにおいて、評価を大別する基準がそれぞれ 30 cent と 40 cent, 40 ms と 60 ms の区間であることを示唆した。また、発声タイミングのずれよりも協和音程からのずれの方が評価に大きく影響している可能性も示唆した。ヴィブラートの位相差と周波数差においては、評価を大別する基準がそれぞれ 0.25π と 0.5π , 0 Hz と 0.5 Hz の区間であることを示唆した。さらに、これらの合成した合唱音声の評価実験により得られた評価基準の妥当性を検証するために実際の人による合唱を解析した結果、協和音程からのずれと発声タイミングのずれにおける評価基準と、発声タイミングのずれよりも協和音程からのずれの方が評価に大きく影響することが、実際の人による合唱においても概ね対応していることが確認できた。

5.2 今後の課題

本研究によって得られた成果は、特定の楽曲や制御手法等から得られたものであり、限定された条件下によるものであるため、より一般的な解明に向け様々な条件下での取り組みが必要とされる。聴取実験での被験者は専門的な音楽経験のない方々だったので、合唱の熟練者や他の専門的な音楽経験のある方を被験者とした調査が必要である。合唱実験における被験者は合唱団に所属してはいるものの比較的経験の浅い方々だったため、より熟練した歌唱者を被験者とした調査が必要である。また、実際の人による合唱からはヴィブラートの解析は行えなかったため、ヴィブラートを用いた合唱の調査も必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なる御指導並びに御鞭撻を賜りました徳田功准教授に深く感謝致します．本研究を進めるに過程において，有益な助言をして頂きました党建武教授，赤木正人教授，鵜木祐史准教授，末光厚夫助教授，並びに徳田研究室，党研究室，赤木研究室，鵜木研究室の皆様にご深く感謝致します．また，本研究を遂行するにあたり，多忙な中，被験者として実験にご協力頂いた北陸先端科学技術大学院大学の方々，金沢大学合唱団の方々に心より感謝致します．最後に，日頃から暖かく見守り研究生生活を支え，大学院での貴重な研究生生活を与えてくれた両親に心から感謝しお礼を申し上げます．

参考文献

- [1] 池田操, 音響分析による楽曲「赤とんぼ」の歌唱評価, 上智教育大学研究紀要, Vol.17, No.1, pp395–407, 1997.
- [2] 片岡靖景, 伊藤一典, 池田操, 中澤達夫, 米沢義道, 今関義弘, 橋本昌巳, 歌唱支援システム構築のための歌声の分析と評価, 情報処理学会研究報告.[音楽情報科学], Vol.98, No.74, pp23–30, 1998.
- [3] 中野倫靖, 後藤真孝, 平賀護, 歌唱力評価の聴取者実験と自動評価手法の検討, 情報処理学会研究報告.[音楽情報科学], Vol.2006, No.19, pp65–72, 2006.
- [4] 山本知仁, 三宅美博, 共同演奏における演奏者間のコミュニケーション解析, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.15, pp563–672, 2004.
- [5] Sundberg, J., The Science of the Singing Voice, Northern Illinois University Press, 1987,
- [6] 野田雄也, 合唱における基本周波数の同期現象に関する基礎研究, 北陸先端科学技術大学院大学修士論文, 2008.
- [7] 河原英紀, Vocoder のもう一つの可能性を探る —音声分析変換合成システム STRAIGHT の背景と展開—, 日本音響学会誌, Vol.63, No.8, pp442–449, 2007.
- [8] 齋藤毅, 歌声知覚・生成機構の解明に向けた歌声合成システム構築に関する研究, 北陸先端科学技術大学院大学修士論文, 2006.
- [9] 佐藤信, 統計的官能検査法, 日科技連, 1985.
- [10] Arkady, P., Michael, R., Jurgen, K., 徳田功, 同期理論の基礎と応用, 丸善, 2009.
- [11] 三浦雅展, 山田真司, 柳田益造, 四声体和声の音楽美を評価するシステム“MAESTRO”, 日本音響学会誌, Vol.59, No.3 pp131–140, 2003.
- [12] Grell, A., Altemuller, E., Port, M., Papid Pitch Correction In Choir Singing, 2008.
- [13] 石本祐一, 時間情報と周波数情報を用いた雑音環境における音声の基本周波数推定に関する研究, 北陸先端科学技術大学院大学修士論文, 1991.