

Title	合唱における基本周波数の同期現象に関する基礎研究
Author(s)	野田, 雄也
Citation	
Issue Date	2008-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/4298
Rights	
Description	Supervisor:徳田 功 准教授, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

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
情報科学研究科情報処理学専攻

野田 雄也

2008 年 3 月

修 士 論 文

合唱における基本周波数の 同期現象に関する基礎研究

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 赤木正人 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

0610068 野田 雄也

提出年月: 2008 年 2 月

概 要

合奏・合唱において演奏者は他の演奏者の奏でる音と、自身の奏でる音のリズムや基本周波数を同期させていると考えられる。しかし音楽の同期現象についての研究報告は少なく、未解明なことが多い。合奏・合唱において基本周波数の引き込みがなければ芸術性の高い演奏は困難である。本研究では合唱における基本周波数の同期現象と音楽の芸術性の関係を明らかにすることを目的とする。芸術性の違いを歌唱のトレーニングの有無と仮定して、トレーニングを積んだ音楽大学院生とトレーニングを積んでいない理工系大学院生の結果を比較することで検討する。実験は歌唱者2名によるロングトーン実験を行った。得られたデータを解析し、基本周波数の同期現象を引き込みにかかる時間から考察する。また、歌唱者2名の組み合わせごとの芸術性を聴取実験による主観評価で決定し、解析したデータと主観評価による芸術性との関係を検討する。

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	1
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	同期現象	3
第 3 章	合唱における基本周波数	4
第 4 章	合唱における F0 同期現象の測定	5
4.1	合唱実験	5
4.1.1	実験目的	5
4.1.2	実験手順	5
4.1.3	実験システム	6
4.1.4	解析方法	8
4.2	実験結果と考察	10
4.2.1	ユニゾン	10
4.2.2	根音+長三度	11
4.2.3	根音+完全五度	12
4.2.4	事前収録音に合わせる歌唱	13
4.3	まとめ	17
第 5 章	歌唱音の聴取による芸術性の決定	18
5.1	聴取実験	18
5.1.1	実験目的	18
5.1.2	実験手順	18
5.2	実験結果と考察	19
5.2.1	ユニゾン (男性)	19
5.2.2	ユニゾン (女性)	19
5.2.3	根音+長三度 (男性)	20
5.2.4	根音+長三度 (女性)	21
5.3	まとめ	22

第 6 章	結論	24
6.1	本論文で明らかになったことの要約	24
6.2	今後の課題	25

図 目 次

2.1	最も簡単な振動子	3
4.1	2 名が同時に歌唱する普通の合唱実験システム概要図	6
4.2	事前に収録した独唱の歌唱音に合わせて歌唱する実験システム概要図	7
4.3	ロングトーン合唱における基本周波数比 (実線) と近似曲線 (破線)	9
6.1	ユニゾンにおける B 組の基本周波数	25

表 目 次

4.1	ユニゾン合唱における整定時間, 安定平均, 安定区間の標準偏差の組ごとの平均	10
4.2	ユニゾン合唱における整定時間と安定平均の標本平均	11
4.3	根音+長三度の合唱における整定時間, 安定平均, 安定区間の標準偏差の組ごとの平均 (B 組は実験失敗によりデータ無し)	11
4.4	根音+長三度の合唱における整定時間と安定平均の標本平均	12
4.5	根音+完全五度の合唱における整定時間, 安定平均, 安定区間の標準偏差の組ごとの平均 (B 組は実験失敗によりデータ無し)	12
4.6	根音+完全五度の合唱における整定時間と安定平均の標本平均	13
4.7	事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱における整定時間, 安定平均, 安定区間の標準偏差の組ごとの平均 (歌唱者 d, 収録音 f のデータは 3 サンプルの平均)	15
4.8	事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱における整定時間と安定平均の母平均	15
4.9	ユニゾン合唱における整定時間と対応する組の事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱における整定時間の平均値	16
4.10	ユニゾン合唱における安定平均と対応する組の事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱における安定平均の平均値	16
5.1	一対比較法における選択率の合計と芸術性の順位 (男性のユニゾン)	19
5.2	芸術性の順位と整定時間, 安定平均の順位との間の順位相関係数 (男性のユニゾン)	19
5.3	一対比較法における選択率の合計と芸術性の序数 (女性のユニゾン)	20
5.4	芸術性の順位と整定時間, 安定平均の順位との間の順位相関係数 (女性のユニゾン)	20
5.5	一対比較法における選択率の合計と芸術性の序数 (男性の根音と長三度の合唱)	21
5.6	芸術性の順位と整定時間, 安定平均の順位との間の順位相関係数 (男性の根音と長三度の合唱)	21
5.7	一対比較法における選択率の合計と芸術性の序数 (女性の根音と長三度の合唱)	22
5.8	芸術性の順位と整定時間, 安定平均の順位との間の順位相関係数 (女性の根音と長三度の合唱)	22

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を伝えるための手段の一つであり、素晴らしい音楽は聴衆に感動を与えることができる。特に複数の演奏者による合奏・合唱は独奏・独唱では実現できないような大きな感動を与えることがある。合奏・合唱において個々の演奏者の技量はもちろん重要な要素であるが、技量の高い演奏者が合奏したときに素晴らしい演奏になるとは限らない。合奏・合唱には独奏・独唱にはない「演奏者同士の関係」という要素が存在するからである。

演奏者は他の演奏者の奏でる音と自身の奏でる音を合わせようとしていると考えられる。合わせる項目としてはリズムや基本周波数などが挙げられる。山本らによる研究 [1] で、2 演奏者間の小節の最初の音の発音時間間隔の差における引き込みと呼吸の吸気ピーク時間間隔の差における引き込みが曲の難易度によって変わるという報告がされている。また Sundberg らの研究 [2] で、合唱団のバス部 6 人にカデンツを歌わせたところ基本周波数の比の標準偏差は 10 ~ 16 cent の間にあるという報告がされている。Sundberg らの研究のように合唱における基本周波数に注目した研究報告はいくつか存在するが基本周波数の同期現象に関しては未だ報告されていない。

合奏・合唱において基本周波数の同期現象が存在していなければ各演奏者の奏でる音の高さがばらばらになり素晴らしい演奏をすることは難しいと考えられる。例えば同じ旋律を奏でている場合、基本周波数が全く合っていなければ芸術性の低い演奏となってしまうが、MIDI のように完全に一致している場合に芸術性が高いとは限らない。そこには一致しすぎず異なりすぎずといった関係があるのではないかと考えられる。また、演奏開始時の基本周波数は各演奏者が持つ音感に左右されるため絶対音感を有する演奏者のみで合奏・合唱する場合を除き演奏開始時から基本周波数が一致することは考えにくい。従って、基本周波数の引き込みが存在していると考えられる。

1.2 研究目的

以上のような背景より、本研究では、合奏・合唱における基本周波数の同期現象に注目した解析を行う。従来の音楽のリズム解析に関する研究ではピアノが多く用いられているが、ピアノは演奏前に行われる調律によって基本周波数が固定されてしまい演奏中に演奏者の意図によって変化させることは出来ない。そこで、より本質的な同期現象を明らかに

するため人間自身が音源である合唱に着目した。また、基本周波数の同期現象と芸術性の関係を調べるために合唱歌唱のトレーニングの有無を芸術性の高低であると仮定し、合唱歌唱のトレーニングを積んだ音楽大学院生と、トレーニングを積んでいない理工系大学院生のグループで合唱実験を行い同期現象の側面からグループ間に差があるかどうかを調べた。

1.3 本論文の構成

本論文は6章により構成される。第1章では研究背景、目的について記述した。第2章は同期現象の定義について記述している。第3章は合唱における基本周波数の状態に関する記述である。第4章は歌唱者2名によるロングトーン合唱実験に関する記述である。第5章は第4章で収録した歌唱音の芸術性を一対比較法により決定する実験に関する記述である。第6章はまとめとして本論文の結論と今後の課題を記述した。

第2章 同期現象

同期現象とは複数の振動子が相互に影響を及ぼしあい同期する現象である。

最も簡単な振動子は、図 2.1 のような円周の上を一定速度で回る変数である。変数を θ とすると、時間を t として

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2.1)$$

と書ける。 ω は角速度である。 $\omega > 0$ とすると θ は一定の割合で増加する。

結合振動子の最も簡単なモデルは、式 2.1 のような振動子が複数つながったものである。結合とは、各振動子が変数 θ を介して相互作用をもつことを指す。簡単のために結合振動子が2個だけある場合を考える。式 2.1 の ω, θ に添字 1, 2 をつけて区別する。2 個の結合振動子のダイナミクスは

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} &= \omega_1 + \epsilon \sin(\theta_2 - \theta_1), \\ \frac{d\theta_2}{dt} &= \omega_2 + \epsilon \sin(\theta_1 - \theta_2), \end{aligned} \quad (2.2)$$

のように表せる。 ϵ は結合強度である。 $\epsilon > 0$ であれば、 θ_1 と θ_2 の差を打ち消しあう相互作用が働く。時間がたつと、 θ_1 と θ_2 の動きが同じになるとき、2 つの振動子は同期するという。ここで θ を位相であると考えれば、2 つの振動子は位相同期しているといえる。また、 $\frac{d\theta_1}{dt}$ と $\frac{d\theta_2}{dt}$ の動きが同じになるとき、2 つの振動子の位相は一致していなくても、周波数が一致しているので周波数同期しているといえる。

これらが最も簡単な同期現象のモデルである。本研究では、周波数同期に着目する。

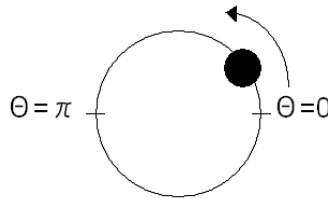


図 2.1: 最も簡単な振動子

第3章 合唱における基本周波数

合唱における基本周波数の状態には大きく分けてユニゾンと和音の2つがある。

ユニゾンとは高さが同じ複数の音が同時に存在することであり、基本周波数は同一となる。

和音とは高さが異なる複数の音が同時に存在することであり、基本周波数は音ごとに異なる値をとる。三和音を基本として五和音、七和音などがある。基本の三和音の中でも長三和音は西洋音楽において極めて重要な位置を占める。ポピュラー音楽においてはメジャーコードとも呼ばれる。長三和音は「根音+長三度+完全五度」で構成される。構成される音の周波数比は使用する音律によってことなり、主要なものとして完全純正律と十二平均律が挙げられる。

完全純正律とは、ある基本音を起点として周波数の比が簡単な整数比となるように、音階の各音を順に決める音律のことである。純正律は心地よい響きを持つ音の組が多く存在する。しかし、ある音程を全て簡単な整数比となるようにすると、他の音程が純正にならないという現象が避けられない。このため移調・転調をする場合は調律をしないとなさなければならないという欠点がある。

十二平均律とは、純正律における矛盾を解消するために考案された音律の一つである。1オクターブを均等に12分割し、12音に割り当てる。各音の幅を一定にすることでどの音の間でも同じ音程であれば同じ基本周波数比となり調律しなおすことなく移調・転調をすることができる。しかし、全ての三度と五度の周波数比が簡単な整数比からずれているためどの音程も一様に響きが悪いという欠点を有する。

長三和音における周波数比は完全純正律で $4:5:6$ 、十二平均律で $1:2^{\frac{4}{12}}:2^{\frac{7}{12}}$ である。本研究では、ユニゾンと長三和音における周波数の関係を用いる。

第4章 合唱におけるF0同期現象の測定

4.1 合唱実験

4.1.1 実験目的

合唱において各歌唱者は互いの基本周波数を同期させていると考えられる。基本周波数の同期現象と芸術性の間の関係を明らかにするために、合唱歌唱のトレーニングの有無を芸術性の高低であると仮定し基本周波数の引き込みの強さと安定状態における基本周波数比においてトレーニングを積んだグループと積んでいないグループの間の差を合唱実験により確認した。

4.1.2 実験手順

2名の歌唱者による合唱実験を行った。実験は防音室内で行い、EGG(Electro Glottograph)信号と歌唱音を同時収録した。EGG信号は声帯の開閉運動を電気信号として記録したもので、基本周波数の抽出が容易であり、歌唱音のように2名の信号が混合することが無く、各歌唱者のより正確な基本周波数を得ることが可能である。歌唱者を、合唱のトレーニング経験の有無によって2つのグループに分けた。合唱のトレーニングを積んだグループとして音楽大学大学院にて声楽を専攻する日本人学生男女各3名(男性:a,b,c, 女性:d,e,f), 合唱のトレーニングを積んでいないグループとして理工系大学院の日本人学生男女3名(男性:g,h,i, 女性:j,k,l)を対象とした。それぞれのグループ内で同性2人1組で実験を行った(A組:a+b, B組:c+b, C組:a+c, D組:d+e, E組:d+f, F組:e+f, G組:h+i, H組:g+i, I組:g+h, J組:j+k, K組:j+l, L組:k+l)。

歌唱内容は、一定の音程で一定時間発声するロングトーンである。実験内容は、2名が同時に歌唱する普通の合唱実験と事前に収録した独唱の歌唱音に合わせて歌唱する実験を行った。

通常の合唱実験は基本周波数の状態をユニゾン、根音+長3度、根音+完全5度とし、事前に収録した独唱の歌唱音に合わせる実験は事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱とした。各実験においてそれぞれ5サンプルずつ収録し、データの欠損が無い場合は収録開始時点から4サンプルを、データが欠損している場合は正常な4サンプルを使用した。ユニゾン、根音+長3度、根音+完全5度に関しては歌唱前にピアノまたはキーボードを用いて

参照音を提示してから実験を行った。実験中は参照音や伴奏などは一切存在しない。また、ビブラートの使用には制限を設けなかった。

4.1.3 実験システム

2名が同時に歌唱する普通の合唱実験の概要図を図 4.1 に示す。2名の被験者はEGG(LxProc)の電極とマイクロフォンを身に着けた状態で合唱する。EGG 信号と歌唱音は EGG 本体を経由してレコーダー (EDIROL R-4) で記録される。レコーダーはモノラル x4 として使用する。

事前に収録した独唱の歌唱音に合わせて歌唱する実験の概要図を図 4.2 に示す。事前収録を行う被験者は EGG(LxProc) の電極とマイクロフォンを身に付けた状態で歌唱する。EGG 信号と歌唱音は EGG 本体を経由してレコーダー (EDIROL R-4) で記録される。レコーダーはステレオ x2 として使用する。収録した EGG 信号と歌唱音は単一のステレオ wav ファイルに保存される。収録音に合わせて歌唱する被験者は EGG(LxProc) の電極とマイクロフォン及びヘッドフォン (HD280) を身に付けた状態で歌唱する。wav ファイルのプレーヤーとしてノート PC(A-Open 1550) で再生し、EGG 信号側チャンネルはレコーダー (EDIROL R-4) へ接続、歌唱音側チャンネルはミキサー (MG102c) へ接続する。EGG 本体から出力される EGG はレコーダーへ接続し、再生中の wav ファイルの EGG 信号と同時に記録される。EGG 本体から出力される歌唱音はミキサーへ接続し、再生中の wav ファイルの歌唱音とミキシングされてヘッドフォンへ出力される。

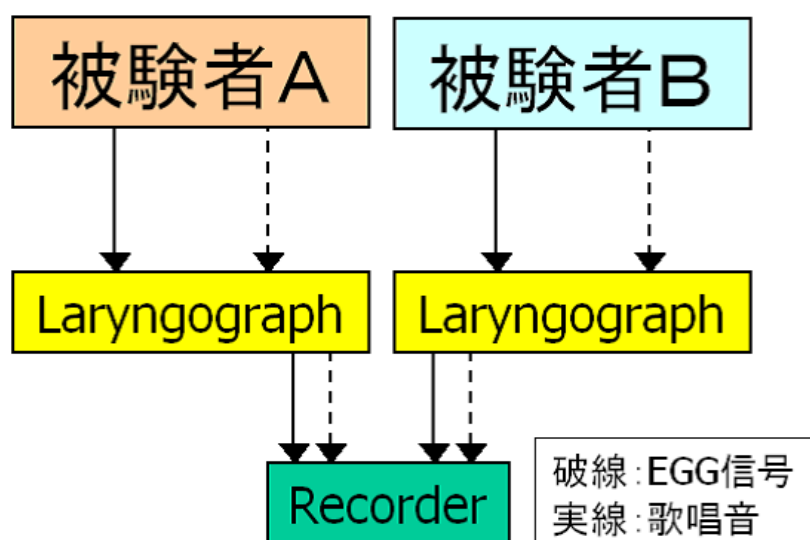


図 4.1: 2名が同時に歌唱する普通の合唱実験システム概要図

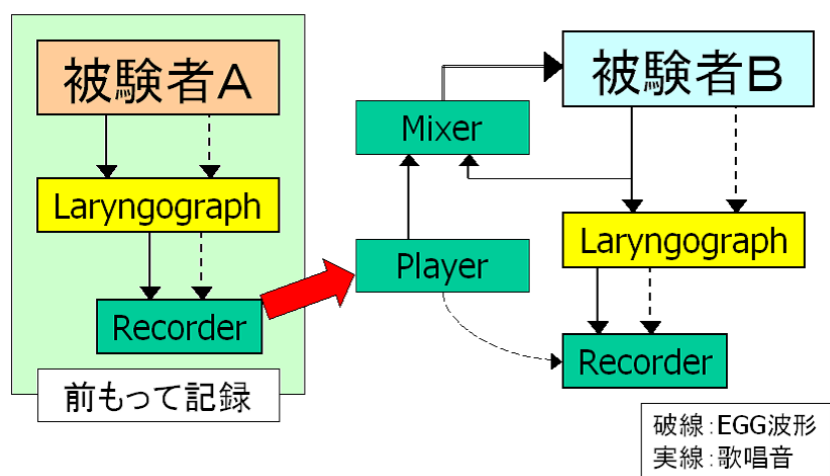


図 4.2: 事前に収録した独唱の歌唱音に合わせて歌唱する実験システム概要図

4.1.4 解析方法

河原らによって提案されている音声分析合成システム STRAIGHT の一部である基本周波数推定法の STRAIGHT-TEMPO を用いて, 測定した EGG 波形から基本周波数を抽出した [3]. 基本周波数推定精度の比較検証を行った石本らの研究において, STRAIGHT-TEMPO による推定が最も高精度であり真の基本周波数に近いことが示されている.[]

歌唱者間における相互作用の結果どのような基本周波数の引き込みが起こるのかを調べるために, 歌唱者 2 名の基本周波数の関係を, 基本周波数の比の絶対値 x を用いる. x の単位としては cent を用いる. 歌唱者 A,B のある時点での基本周波数をそれぞれ $f_A[\text{Hz}]$ と $f_B[\text{Hz}]$ とすると, x は以下の式で与えられる.

$$x = |1200 \cdot \log_2(\frac{f_A}{f_B})| \quad [\text{cent}]. \quad (4.1)$$

十二平均律において, 1 オクターブは 1200 cent, 1 半音は 100 cent となり, 人間の感覚に近い単位となっている.

引き込みの強さを評価するために, x が安定するまでの時間, すなわち整定時間 T_s を以下のように定義する.

発声開始時点から安定点まで指数関数的な減衰が起こると仮定すると周波数比 x の時間的变化は,

$$x(t) = \bar{x} + a \cdot e^{-b \cdot t} \quad (4.2)$$

と表せる. ただし, $\bar{x}$ は全データにおいてほぼ安定状態であると判断できる 1.5 秒 ~ 2.5 秒の区間の平均値, $\bar{x} + a$ は発声開始時点における初期値, b は減衰係数である. 安定したと判断する周波数比 x の閾値を x_{th} とすると整定時間 T_s は

$$x(T_s) = a \cdot e^{-b \cdot T_s} + \bar{x} = x_{th} \quad (4.3)$$

で与えられる. 閾値はユニゾン合唱の全データにおいてほぼ安定状態であると判断できる 1.5 秒 ~ 2.5 秒の区間についてそれぞれ標準偏差を求め, その平均値に基づき $x_{th} = 17[\text{cent}]$ とした. パラメータ a, b の決定には両歌唱者が発声した時点から 1.5 秒経過するまでの区間を対象に最小二乗法を用いて求める. 推定された係数により整定時間は,

$$T_s = -\frac{1}{b} \cdot \ln(\frac{x_{th} - \bar{x}}{a}) \quad (4.4)$$

と求まる. ただし, T_s が負値になった場合は整定時間を 0 秒とする. 負値になるのは, 指数近似した際に 0 秒において既に閾値以下になっている場合であるため, 歌い出した時点から安定状態であるとみなす.

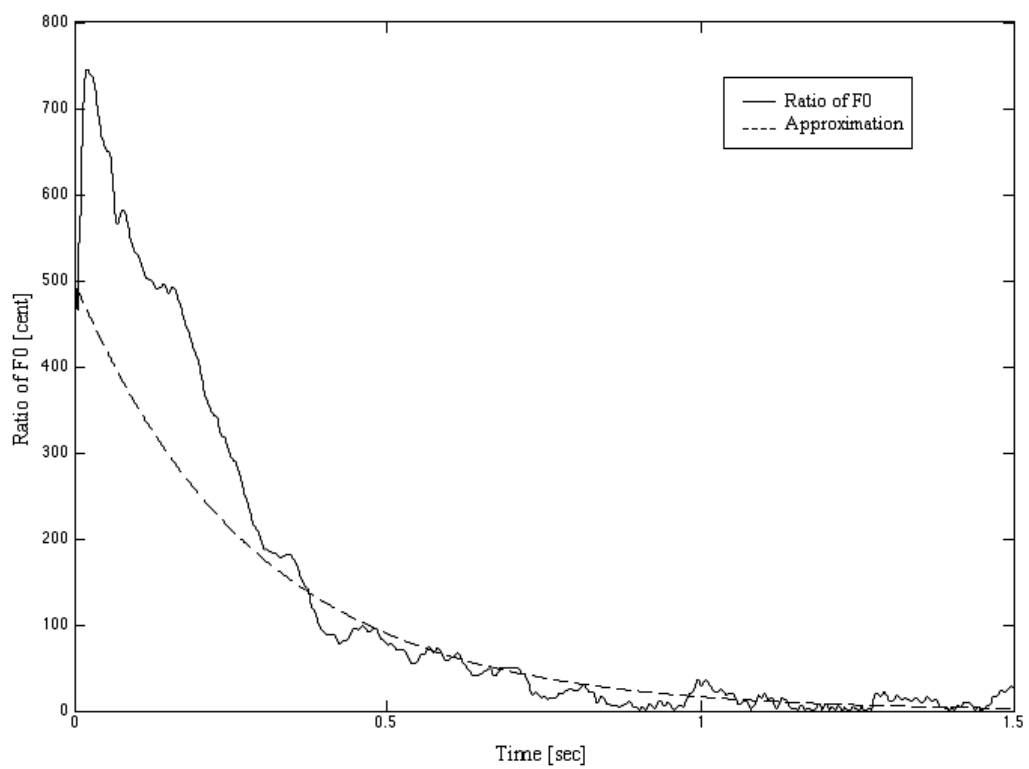


図 4.3: ロングトーン合唱における基本周波数比 (実線) と近似曲線 (破線)

4.2 実験結果と考察

4.2.1 ユニゾン

ユニゾンにおけるロングトーン合唱の解析結果を表 4.1 に示す。整定時間の範囲は音楽大学院生が 0.2 秒～0.7 秒、理工系学生が 0.6 秒～1 秒であることが分かる。しかし、音楽大学院生の E 組は 1.03 秒、理工系学生の L 組は 0.33 秒であるなど傾向とは異なる値をとるデータも存在している。安定平均は F 組を除き音大生の方が 0 cent に近いことが分かる。安定区間における標準偏差は、ビブラートがかかっている音楽大学院生の方が大きいと予測していたが、結果は音楽大学院生、理工系大学院生ともに 7～20cent の広い範囲に分布した。

各組み合わせの平均値からは、音楽大学院生のグループと理工系学生のグループに差があるように見えるが実際に差があるかどうか母平均の差の検定により確かめた。各グループのデータから同性のものを選択して 2 つの母集団とし、母平均が等しいという帰無仮説に対して有意水準 5% で片側 t-検定を行った。整定時間を対象として検定を行うと、男性、女性ともに帰無仮説は棄却できないという結果が得られた。この結果は「2 つのグループ間に整定時間に関して有意な差があるとは言えない」ということを示している。安定平均を対象として同様の検定を行うと、男性、女性のどちらも帰無仮説は棄却された。この結果は「2 つのグループ間に安定平均に関して有意な差がある」ということを示している。各母集団の整定時間と安定平均の母平均を表 4.2 に示す。有意な差がある安定平均に注目すると、男性は音楽大学院生の方が理工系学生に比べて 0 [cent] に近いが女性は理工系学生の方が 0 に近いということが分かる。

表 4.1: ユニゾン合唱における整定時間、安定平均、安定区間の標準偏差の組ごとの平均

	音大生 (男)			音大生 (女)		
	A	B	C	D	E	F
整定時間 [sec]	0.62	0.50	0.73	0.21	1.03	0.28
安定平均 [cent]	11.9	2.3	2.4	4.7	8.9	38.2
標準偏差 [cent]	14.0	14.4	14.3	7.6	19.7	17.0
	理工系学生 (男)			理工系学生 (女)		
	G	H	I	J	K	L
整定時間 [sec]	0.80	0.61	0.96	0.97	0.86	0.33
安定平均 [cent]	14.9	32.0	14.8	7.3	5.0	4.2
標準偏差 [cent]	14.4	16.8	13.4	21.1	16.3	11.6

表 4.2: ユニゾン合唱における整定時間と安定平均の標本平均

母集団	整定時間 [sec]	安定平均 [cent]
音大生 (男性)	0.62	5.5
理工系 (男性)	0.79	20.6
音大生 (女性)	0.51	17.3
理工系 (女性)	0.72	5.5

4.2.2 根音+長三度

根音と長三度でのロングトーン合唱の解析結果を表 4.3 に示す. 根音と長三度は十二平均律で 400 cent, 完全純正律で 386.3 cent の関係である. 整定時間は E 組を除き音楽大学院生の方が短い傾向があることが分かる. 安定平均は E, F 組が 260 cent 前後と長 3 度の比率から大きく外れていることが分かる. これらの組の歌唱音を聴取すると根音と長三度の関係ではなく不協和音になっていることが分かる.

ユニゾンでの解析と同条件で t-検定を行った. 整定時間は男女ともに音楽大学院生と理工系学生の上に有意な差はみられない. 安定平均は男性の場合, 音楽大学院生と理工系学生の上に有意な差はみられないが, 女性の場合は有意な差があるという結果が得られた. 各母集団の整定時間と安定平均の母平均を表 4.4 に示す. 安定平均の母平均に注目すると音楽大学院生女性の値が 298.7 [cent] と根音と長三度の関係から大きく外れている. これは前述の E, F 組の影響である.

表 4.3: 根音+長三度の合唱における整定時間, 安定平均, 安定区間の標準偏差の組ごとの平均 (B 組は実験失敗によりデータ無し)

	音大生 (男)			音大生 (女)		
	A	B	C	D	E	F
整定時間 [sec]	0.73	—	0.73	0.54	1.46	0.70
安定平均 [cent]	367	—	398	367	268	261
標準偏差 [cent]	15.9	—	17.5	9.3	12.4	14.4
	理工系学生 (男)			理工系学生 (女)		
	G	H	I	J	K	L
整定時間 [sec]	1.91	0.48	0.64	0.94	0.64	0.28
安定平均 [cent]	422	410	376	428	300	362
標準偏差 [cent]	12.6	17.2	15.7	13.3	14.6	14.9

表 4.4: 根音+長三度の合唱における整定時間と安定平均の標本平均

母集団	整定時間 [sec]	安定平均 [cent]
音大生 (男性)	0.73	382.8
理工系 (男性)	1.01	402.9
音大生 (女性)	0.90	298.7
理工系 (女性)	0.62	363.5

4.2.3 根音+完全五度

根音と完全五度でのロングトーン合唱の解析結果を表 4.5 に示す. 根音と完全五度は十二平均律で 700 cent, 完全純正律で 702 cent の関係である. 整定時間は音楽大学院生と本学学生の間にはっきりとした差は見られない. 安定平均は E,F,J,K,L 組が 600 cent 前後であり完全 5 度の比率から大きく外れていた. これらの組の歌唱音を聴取すると根音と完全五度の関係ではなく不協和音になっていることが分かる.

ユニゾンでの解析と同条件で t-検定を行った結果, 整定時間は男女ともに音楽大学院生と理工系学生の間には有意な差はみられなかった. また, 安定平均では男女ともに有意な差があるという結果が得られた. 各母集団の整定時間と安定平均の母平均を表 4.6 に示す. 理工系学生女性の安定平均の母平均が 587 [cent] と根音と完全五度の関係から大きく外れていた.

表 4.5: 根音+完全五度の合唱における整定時間, 安定平均, 安定区間の標準偏差の組ごとの平均 (B 組は実験失敗によりデータ無し)

	音大生 (男)			音大生 (女)		
	A	B	C	D	E	F
整定時間 [sec]	0.82	—	0.59	1.48	0.78	0.86
安定平均 [cent]	695	—	676	694	629	640
標準偏差 [cent]	16.4	—	18.0	11.0	20.5	20.7
	理工系学生 (男)			理工系学生 (女)		
	G	H	I	J	K	L
整定時間 [sec]	0.72	0.76	0.86	0.83	0.84	0.43
安定平均 [cent]	735	707	709	588	554	620
標準偏差 [cent]	14.4	10.1	12.6	19.2	15.8	10.9

表 4.6: 根音+完全五度の合唱における整定時間と安定平均の標本平均

母集団	整定時間 [sec]	安定平均 [cent]
音大生 (男性)	0.71	685.7
理工系 (男性)	0.78	717.7
音大生 (女性)	1.04	654.1
理工系 (女性)	0.70	587.0

4.2.4 事前収録音に合わせる歌唱

事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱実験は、各歌唱者個人の基本周波数を合わせる能力や引き込みの強さを調べるために行った。事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱の解析結果を表 4.7 に示す。各組の整定時間、安定平均、安定区間における標準偏差の平均は歌唱者と収録音の組み合わせによって異なる。

歌唱者に注目すると、歌唱者1は整定時間が0.5秒前後と短く安定平均も3 cent 前後であることから基本周波数を合わせる能力や引き込みの強さが他の歌唱者に比べて特に強いのではないかと考えられる。歌唱者1は理工系学生であるため歌唱のトレーニングを積んでいないグループに属するが器楽の経験を有する。従って、歌唱のトレーニングを積んでいない場合でも歌唱以外の音楽経験が基本周波数を合わせる能力や引き込みの強さに影響を与える可能性が考えられる。合唱実験において歌唱者1が含まれる組はK組とL組である。整定時間はユニゾン合唱のL組、根音と長三度の合唱のK組、L組が0.3~0.6秒と短く安定平均はユニゾン合唱において4~5 cent であることから歌唱者1の特徴が現れている。これにより、音楽大学院生のグループと理工系学生のグループという2つの芸術性のグループではなく、歌唱者の組み合わせごとに芸術性を評価する必要があることが分かった。

収録音に注目すると、収録音 b,f に合わせる歌唱の標準偏差が他の結果に比べて大きな値になっている。これは収録音 b,f に強いビブラートがかかっていたためである。

ユニゾンでの解析と同条件で t-検定を行った。整定時間は男性の場合、音楽大学院生のグループと理工系学生のグループの間に有意な差があるとは言えないが、女性の場合、有意な差があるという結果が得られた。安定平均は男性、女性ともに有意な差があるという結果が得られた。各母集団の整定時間と安定平均の母平均を表 4.8 に示す。整定時間は女性に注目すると、音楽大学院生の方が安定するまでにかかる時間が長いことが分かる。安定平均は男性の場合、音楽大学院生の方が理工系学生に比べて0 [cent] に近いが、女性の場合は理工系学生の方が0 [cent] に近いことが分かる。

本項では歌唱者個人の能力に注目して解析・考察を行ってきたが、2名の歌唱者が合唱した場合の整定時間や安定平均はそれぞれの歌唱者が相手の事前収録音に合わせて歌った場合の整定時間や安定平均の単純な平均となっているのか、組み合わせの相性によって結果が変わるのかを、ユニゾン合唱実験の結果と事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱実験の結果を比較することで調べた。ユニゾン合唱実験の結果と事前収録音にユニゾンで合わ

せる歌唱実験における各組の平均値を表 4.9, 表 4.10 に示す. 整定時間に関しては, 組み合わせによって事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱実験における各組の平均値より短くなっている場合も長い場合も存在している. このため, 単純な平均ではなく歌唱者間の相性などが強く出ているのではないかと考えられる. 一方, 安定平均に関しては, 事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱実験における各組の平均値よりユニゾン合唱の結果の方が概ね 0 [cent] に近い値または同程度の値をとっている. これは片方が事前収録音の場合, 合わせる側の人には相手の基本周波数が変化するとその差分を全て 1 人で補正しなければならないが, 両者が基本周波数を合わせようとする場合, 両者の基本周波数に差が生じたとしてもその差分の半分ずつを補正すればよいいため合わせ易いのではないかと考えられる. これは合唱において基本周波数の同期現象が, 音高が安定して合っているという状態を作り出す重要な要素である可能性を示唆している.

表 4.7: 事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱における整定時間, 安定平均, 安定区間の標準偏差の組ごとの平均 (歌唱者 d, 収録音 f のデータは 3 サンプルの平均)

グループ	音大生 男性					
歌唱者	a		b		c	
収録音	b	c	a	c	a	b
整定時間 [sec]	0.78	0.92	0.79	0.98	0.48	0.85
安定平均 [cent]	4.9	14.0	16.3	35.6	15.9	4.7
標準偏差 [cent]	33.6	16.0	17.4	14.5	10.8	42.1
グループ	理工系学生 男性					
歌唱者	g		h		i	
収録音	h	i	g	i	g	h
整定時間 [sec]	1.09	0.79	0.95	0.89	0.56	0.70
安定平均 [cent]	82.7	6.5	35.8	20.0	19.5	25.7
標準偏差 [cent]	19.6	15.7	19.5	14.6	15.3	19.7
グループ	音大生 女性					
歌唱者	d		e		f	
収録音	e	f	d	f	d	e
整定時間 [sec]	1.03	1.07	0.99	0.67	0.69	0.84
安定平均 [cent]	7.6	13.5	33.9	12.4	19.4	30.1
標準偏差 [cent]	7.2	29.4	13.0	39.7	19.9	15.6
グループ	理工系学生 女性					
歌唱者	j		k		l	
収録音	k	l	j	l	j	k
整定時間 [sec]	0.44	0.93	0.90	0.72	0.53	0.50
安定平均 [cent]	12.4	12.2	11.0	14.8	3.0	3.4
標準偏差 [cent]	16.7	11.0	23.4	16.9	25.3	15.9

表 4.8: 事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱における整定時間と安定平均の母平均

母集団	整定時間 [sec]	安定平均 [cent]
音大生 (男性)	0.80	15.2
理工系 (男性)	0.83	31.7
音大生 (女性)	0.95	19.7
理工系 (女性)	0.67	9.5

表 4.9: ユニゾン合唱における整定時間と対応する組の事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱における整定時間の平均値

	音大生 (男)			音大生 (女)		
	A	B	C	D	E	F
ユニゾンにおける整定時間 [sec]	0.62	0.50	0.73	0.21	1.03	0.28
収録音に合わせる歌唱における整定時間 [sec]	0.79	0.91	0.70	0.79	0.67	1.02
	理工系学生 (男)			理工系学生 (女)		
	G	H	I	J	K	L
ユニゾンにおける整定時間 [sec]	0.80	0.61	0.96	0.97	0.86	0.33
収録音に合わせる歌唱における整定時間 [sec]	1.01	0.88	0.75	0.67	0.73	0.61

表 4.10: ユニゾン合唱における安定平均と対応する組の事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱における安定平均の平均値

	音大生 (男)			音大生 (女)		
	A	B	C	D	E	F
ユニゾンにおける安定平均 [cent]	11.9	2.3	2.4	4.7	8.9	38.2
収録音に合わせる歌唱安定平均 [cent]	10.6	20.1	14.9	22.8	13.0	59.2
	理工系学生 (男)			理工系学生 (女)		
	G	H	I	J	K	L
ユニゾンにおける安定平均 [cent]	14.9	32.0	14.8	7.3	5.0	4.2
収録音に合わせる歌唱における安定平均 [cent]	20.7	16.5	21.3	11.7	7.6	9.1

4.3 まとめ

合唱のトレーニングを積んだグループと積んでいないグループの間に、安定平均に関しては有意な差がみられたが整定時間に関しては有意な差はみられなかった。しかし収録した音を聴取した主観的印象では、芸術性の高さは歌唱者の組み合わせによって異なっているように感じられた。また事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱の解析では歌唱以外の音楽経験が基本周波数を合わせる能力や引き込みの強さに影響する可能性が示唆された。ユニゾンと事前収録音に合わせる歌唱の結果を比較することで、整定時間については歌唱者間の相性の影響が強く、個人の引き込みが強い場合でも組み合わせによっては安定するまでにかかる時間が長くなる場合があることが分かった。安定平均については事前収録音に合わせる歌唱に比べてユニゾン合唱の方が概ね 0 [cent] に近づくことが分かった。合唱において基本周波数の同期現象が、音高が安定して合っているという状態を作り出す重要な要素である可能性が示唆された。今後、安定している区間における基本周波数の同期現象について明らかにする必要があると考えられる。

第5章 歌唱音の聴取による芸術性の決定

5.1 聴取実験

5.1.1 実験目的

前章において芸術性の高さは合唱歌唱のトレーニングの有無だけではなく歌唱者の組み合わせや、歌唱者の歌唱以外の音楽経験が影響している可能性が示唆された。そこで本章では、前章の実験時に収録した歌唱音を聴取し主観評価することで歌唱者の組み合わせごとの芸術性を決定し、決定された芸術性と整定時間や安定平均の間の関係を調べた。

5.1.2 実験手順

聴取実験は一対比較法 [4] によって行った。一対比較法とは複数個の測定対象から作られた二つずつの全ての組み合わせの刺激対を被験者に提示し、被験者はある判断基準によってどちらかの対象を選択する方法である。番号 j, k の刺激が提示されたとき番号 k の刺激が選択された比率 p_{jk} から $\sum_j p_{jk}$ を求める。 $\sum_j p_{jk}$ の大小が序数尺度となる。

被験者に提示する刺激は、前章において EGG 信号と同時収録した歌唱音である。刺激対の数は、1 つの試行について刺激順序の違いも考慮した $6 \times 5 = 30$ 対 (男性の根音と調三度の合唱は $5 \times 4 = 20$ 対) である。被験者はヘッドフォン (HD280) を身につけ、ノート PC (A-Open 1550) より出力される音声を聴取する。刺激の提示順序は音声 1、音声 2 の順に被験者の任意のタイミングで 1 回ずつ提示した。刺激は約 4 秒のロングトーンが 1 秒間隔で 4 つ提示される。

被験者は、歌唱者とは異なる理工系大学院生 4 名 (男性) である。男性の歌唱音に対して 2 名、女性の歌唱音に対して 2 名が各 3 回ずつ判断した。

被験者には以下のような教示を与え、合唱歌唱音の基本周波数に関する芸術性について評価してもらった。

- ・ 2 つの音声提示されます
- ・ 音声 1、音声 2 の順に聴取し、どちらの方がピッチ (音高) がきれいに合っていたかを判断して表に記入してください

また、被験者にユニゾンもしくは根音と長三度の合唱のどちらの実験であるかということとを事前に提示している。

5.2 実験結果と考察

5.2.1 ユニゾン (男性)

一対比較法における選択率の合計と芸術性の順位を表 5.1 に示す.

聴取実験における芸術性の順位は $C > A > B > H > G > I$ となった.

第 4 章の解析結果と, 本章の芸術性の順位との間の関係を調べるために, スピアマンの順位相関係数 ρ を求める [5]. ρ は,

$$\rho = 1 - \frac{6\sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (5.1)$$

で求められる. ただし, D は対応する二つの順位の差, N は値のペアの数である. ρ は両方の順位が完全に一致したとき +1 を, 両方の順位が完全に逆のとき -1 をとる.

整定時間を短い順に並べると $B > H > A > C > G > I$ である. 安定平均を 0 cent に近い順に並べると $B > C > A > I > G > H$ である. 求めた順位相関係数を表 5.2 に示す. 芸術性と安定平均の順位相関係数の方が芸術性と整定時間のものより値が大きく, 男性のユニゾンでは整定時間に比べて安定平均の方が基本周波数の芸術性に影響を与えていると考えられる.

表 5.1: 一対比較法における選択率の合計と芸術性の順位 (男性のユニゾン)

組	選択率の合計	序数
A	3.92	2
B	3.58	3
C	4.42	1
G	1.08	5
H	1.33	4
I	0.67	6

表 5.2: 芸術性の順位と整定時間, 安定平均の順位との間の順位相関係数 (男性のユニゾン)

芸術性と整定時間	0.49
芸術性と安定平均	0.6

5.2.2 ユニゾン (女性)

一対比較法における選択率の合計と芸術性の順位を表 5.3 に示す.

聴取実験における選択率の順位は $D > E > L > J > F > K$ となった。

第4章の解析結果と比較する。整定時間を短い順に並べると $D > F > L > K > J > E$ である。安定平均を 0 cent に近い順に並べると $L > D > K > J > E > F$ である。求めた順位相関係数を表 5.4 に示す。相関係数の値はどちらも小さく、芸術性と整定時間、安定平均の間の相関は非常に弱いあるいは無いということが考えられる。芸術性と安定平均の順位相関係数の方が芸術性と整定時間のものより値が大きく、男性のユニゾンと同様に女性のユニゾンも整定時間に比べて安定平均の方が基本周波数の芸術性に影響を与えていると考えられる。

表 5.3: 一対比較法における選択率の合計と芸術性の序数 (女性のユニゾン)

組	選択率の合計	序数
D	4.67	1
E	3.67	2
F	1.00	5
J	2.25	4
K	0.92	6
L	2.50	3

表 5.4: 芸術性の順位と整定時間、安定平均の順位との間の順位相関係数 (女性のユニゾン)

芸術性と整定時間	0.14
芸術性と安定平均	0.31

5.2.3 根音+長三度 (男性)

一対比較法における選択率の合計と芸術性の順位を表 5.5 に示す。

聴取実験における選択率の順位は $A > G > C > I > H$ となった。

第4章の解析結果と比較する。整定時間を短い順に並べると $H > I > A = C > G$ である。安定平均を十二平均律 400 cent に近い順に並べると $C > H > G > I > A$ であり、完全純正律 386.3 cent に近い順に並べると $I > C > A > H > G$ である。求めた順位相関係数を表 5.6 に示す。相関係数は整定時間、安定平均の平均律、純正律の全てにおいて負の値をとった。これは整定時間が長い、安定平均が平均律や純正律から遠い方が芸術性が高いということを示しているが、音楽的観点から考えても安定平均が平均律や純正律から遠い方が芸術性が高いということは考えにくい。

原因としては以下の2つが考えられる。

1つ目の原因としては、実験時に収録した歌唱音を聴取して芸術性の判定をしているため、「きれいにピッチが合っている方を選択する」と教示していたとしても聴取者が音楽大学院生のビブラートや声質などの影響を受けてしまいピッチのみに注目した判断を下すのが困難であった可能性が挙げられる。ユニゾンより判断の難易度が高い根音と長三度の合唱においてそれらが表面化した可能性は十分考えられる。

2つ目の原因は、整定時間や安定平均の順位は4サンプルの平均値で求めているが聴取実験による評価の際は4サンプルを全て別々に聴取してから、その組の芸術性を総合的に判断しているため1サンプルだけ整定時間が長かったり安定平均が大きくずれていたりしても、その他のサンプルが高評価であれば順位が高くなる可能性が挙げられる。G組に注目したとき4サンプルの平均値では整定時間が最下位、完全純正律を基準とした安定平均も最下位であるが、個々のサンプルの詳細を調べると整定時間が極めて長い4秒のサンプルが1つ、安定平均が完全純正律から約100 [cent] ずれているサンプルが1つでありその他のサンプルについては整定時間が長すぎることも無く、安定平均も400 [cent] 前後である。

従って、今後このような芸術性の判断を行う場合は刺激から基本周波数以外の特徴を抑えたものを使用することや、聴取するサンプルをその組を代表する1サンプルだけにし、整定時間や安定平均の順位もそのサンプルのみから求めるなどの工夫が必要である。

表 5.5: 一対比較法における選択率の合計と芸術性の序数 (男性の根音と長三度の合唱)

組	選択率の合計	序数
A	3.92	1
B	—	—
C	2.25	3
G	2.42	2
H	0.00	5
I	1.42	4

表 5.6: 芸術性の順位と整定時間、安定平均の順位との間の順位相関係数 (男性の根音と長三度の合唱)

芸術性と整定時間	-0.78
芸術性と安定平均 (十二平均律)	-0.5
芸術性と安定平均 (完全純正律)	-0.2

5.2.4 根音+長三度 (女性)

一対比較法における選択率の合計と芸術性の順位を表 5.7 に示す。

聴取実験における選択率の順位は $L > J > E > K > D > F$ となった。

第4章の解析結果と比較する。整定時間を短い順に並べると $L > D > K > F > J > E$ である。安定平均を十二平均律 400 cent に近い順に並べると $J > D > L > K > E > F$ であり、完全純正律 386.3 cent に近い順に並べると $D > L > J > K > E > F$ である。求めた順位相関係数を表 5.8 に示す。ユニゾンの結果と同様に、女性の根音と長三度の合唱は整定時間に比べて安定平均の方が基本周波数の芸術性に影響を与えていると考えられる。

表 5.7: 一対比較法における選択率の合計と芸術性の序数 (女性の根音と長三度の合唱)

組	選択率の合計	序数
D	1.83	5
E	2.50	3
F	1.75	6
J	3.08	2
K	2.33	4
L	3.50	1

表 5.8: 芸術性の順位と整定時間, 安定平均の順位との間の順位相関係数 (女性の根音と長三度の合唱)

芸術性と整定時間	0.09
芸術性と安定平均 (十二平均律)	0.49
芸術性と安定平均 (完全純正律)	0.37

5.3 まとめ

ユニゾンにおける男女の結果と、根音と長三度の合唱における女性の結果から、整定時間に比べて安定平均の方が芸術性に影響を及ぼしていると考えられる。

根音と長三度の合唱における男性の結果から、本手法による芸術性の決定方法の欠点が明らかとなった。

1 つ目は、ビブラートや声質といった本研究でターゲットとしていない芸術性に関わる要素の影響を聴取者が受けてしまい基本周波数のみに注目した芸術性の判断を下すのが困難であった可能性が考えられる。

2 つ目は、整定時間や安定平均の順位は 4 サンプルの平均値から求めているが聴取実験による評価の際は 4 サンプル全てを聴取して総合的に判断しているため 1 サンプルだけ整

定時間が長かったり安定平均が大きくずれていたとしても、その他のサンプルが高評価であれば順位が高くなる可能性がある。

従って、今後このような芸術性の判断を行う場合は刺激から基本周波数以外の特徴を抑えたものを使用することや、聴取するサンプルをその組を代表する 1 サンプルし、整定時間や安定平均の順位も使用したサンプルのみから求めるなどの工夫が必要となる。また、被験者数も十分であったとは言えないため増やすことを検討する必要がある。

第6章 結論

6.1 本論文で明らかになったことの要約

本研究では歌唱者2名での合唱時における EGG 信号と歌唱音を同時収録する実験を行った。合唱歌唱のトレーニングの有無を芸術性の高低と仮定し、トレーニングを積んだグループとして声楽を専攻する音楽大学院生のグループを、トレーニングを積んでいないグループとして理工系を専攻する大学院生のグループを対象として実験した。基本周波数比が安定するまでの時間として定義した整定時間と、安定後の基本周波数比の平均値として定義した安定平均の2点から考察した結果、安定平均に関しては2グループ間に有意な差が見られたが整定時間に関しては有意な差はみられなかった。また事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱の解析では歌唱以外の音楽経験が基本周波数を合わせる能力や引き込みの強さに影響している可能性が示唆された。ユニゾンでの合唱と事前収録音にユニゾンで合わせる歌唱の結果の比較では、整定時間に関しては歌唱者間の影響が強く、個人の能力として引き込みが強いとしても組み合わせによっては安定するまでにかかる時間が長くなる場合があることが分かった。安定平均に関してはユニゾンでの合唱の方が概ね0 [cent] に近づくことが分かった。これは、事前収録音に合わせる場合収録音の基本周波数が変動した際に歌唱者1人で追従しなければならないため基本周波数の補正量が多くなるが、通常の合唱であれば同様に基本周波数が変動しても歌唱者2名でお互いに合わせようとすることで基本周波数の補正量が少なくても十分に合わせることが可能であるため、目標とする基本周波数比の状態に近づけ易くなるのではないかと考える。

また、ここまでの実験で芸術性の高さは歌唱のトレーニングの有無だけではなく歌唱者の組み合わせや、歌唱以外の音楽経験などが影響している可能性が示唆されたため、実験時に収録した歌唱音を聴取し主観評価することで歌唱者の組み合わせごとの芸術性を決定し、決定された芸術性と整定時間や安定平均の間の関係を調べた。この結果、整定時間に比べて安定平均の方が芸術性に影響を及ぼしている結果が得られた。根音と長三度の合唱における男性の結果から今回行った主観評価の改善点として、刺激に基本周波数以外の特徴を抑えたものを使用することや、評価を組ごとではなく1サンプルごとにするなどの工夫が必要であるということが明らかとなった。

6.2 今後の課題

本研究における実験により、合唱実験における2名同時収録の実験システムの基盤を作ることができたので、これを活用して楽曲を対象とした合唱実験や基本周波数の同期状態を強制的に破壊する実験などへの応用が考えられる。また、今回の解析手法は一定時間同じ音高の音が存在していなければ使用できないため音高の変化が激しい楽曲を対象とする場合は解析手法の改良についても検討する必要がある。芸術性の主観評価は被験者数が十分ではなかったことと基本周波数の同期現象に関する芸術性は整定時間に比べて安定平均の影響の方が大きいということが分かった。今後は安定している区間の同期現象やビブラートの同期などの解明も期待される。ビブラートの同期現象と考えられる区間を図 6.1 に示す。

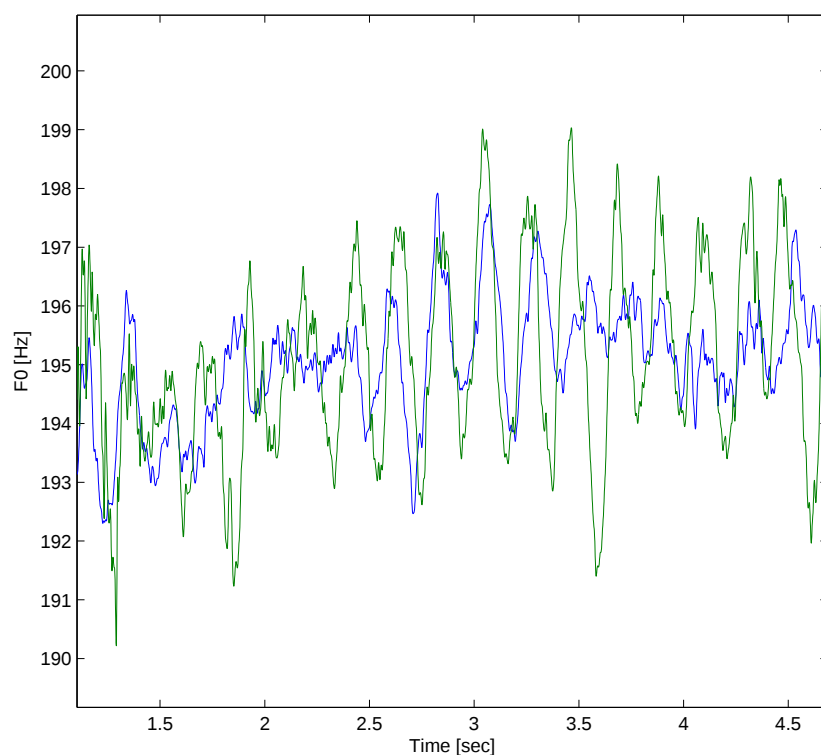


図 6.1: ユニゾンにおける B 組の基本周波数

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なる御指導並びにご鞭撻賜りました、徳田功准教授に深く感謝いたします。本研究を進める過程において、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、Lu Xugang 助教、Li Junfeng 助教、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いたします。また、ご多忙のなか研究に対する有益な助言をして頂きました北海道医療大学心理科学部 榊原健一准教授に深く感謝いたします。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御協力いただいた北陸先端科学技術大学院大学の方々、武蔵野音楽大学大学院の方々に心より感謝いたします。最後に、研究生生活を暖かく見守ってくれた家族、友人そして知人の皆様にご心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 山本知仁, 三宅美博, “ 共同演奏における演奏者間コミュニケーションの解析 ”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 5, pp563–672, 2004.
- [2] Johan Sundberg, The Science of the Singing Voice, Northern Illinois University Press, 1987.
- [3] 河原, Zolfaghari, Cheveigne, Patterson, “ 周波数から瞬時周波数への写像の不動点を用いた音源情報の抽出について ”, 信学技報, SP99-40, 1999.
- [4] 難波精一郎, 桑野園子, 音の評価のための心理学的測定法, 日本音響学会編, 音響テクノロジーシリーズ 4, コロナ社, 1998.
- [5] 東京大学教養学部統計学教室 編, 統計学入門, 東京大学出版会, 1991.
- [6] 増田直紀, 今野紀雄, 複雑ネットワークの科学, 産業図書, 2005.
- [7] 蔵本由紀, リズム現象の世界, (三村昌泰 [監修]), 東京大学出版会, 2005.
- [8] Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S., Vetterling, W.T., Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, Cambridge, 1988.