

PCM方式電子楽器の周波数の精度について

On the accuracy of the frequency of the electronic musical instrument by the PCM system

加藤充美

Mitsumi Kato

くらしき作陽大学音楽学部

Kurashiki Sakuyo University, the faculty of music

概略

現在の電子楽器は、デジタル化されPCM方式が主流である。この方式は音色の自然さなどが特徴である。また音量や周波数をMIDIやコンピュータで容易に制御できる。そのため色々な実験に自然楽器の代わりに使われることが多い。しかし民生用の機械であるために、直接心理実験などに使う場合には周波数の精度などに注意が必要である。本報告では電子楽器の周波数の精度を決める要因と実際の電子楽器の測定例を報告する。

Present electronic musical instruments are digitized and PCM system is in use. Their tones are natural. Moreover, amplitude and frequency are easily controllable by MIDI or the computer. Therefore, it is used for various acoustical experiments in many cases instead of some acoustical musical instruments. However, since they are commercial machine, cautions are required for the accuracy of frequency etc when they used for acoustical experiments. This report explains factors which determine the accuracy of the frequency of the electronic musical instruments, and reports some examples of measurement of actual electronic musical instruments.

1. はじめに

近年電子楽器はデジタル化がすすみ、ピッチや音色などが安定して出せるようになっており、さらにPCM方式になって自然楽器の音を録音し再生するため自然な音色を発することができるようになった。MIDIのベロシティやコントロールチェンジ、ピッチベンドを用いれば、容易に音量や音色・ピッチなどの制御が可能である。そのため条件を制御することが困難な自然楽器の代わりにさまざまな音楽音響や音楽心理研究の道具として使うことが考えられる。しかしながら電子楽器の本来の目的は音楽の演奏や制作であるため、色々な制御の精度が実用に支障がない範囲に収められている。電子楽器の音を、たとえば心理実験のサンプル音として使う場合には、発音するピッチ周波数などの検証が必要である。

本報告では、電子楽器に周波数の精度を決める要因について説明し、実際の電子楽器の周波数を測定した例を報告する。

2. PCM方式のピッチ発生の原理

PCM方式は、デジタル録音した自然楽器音をメモリに記録し、そのデータを押鍵された鍵に応じた周波数になるように読み出しながら再生する方式である。そのため質のよいサンプル音の録音や、色々な奏法に対応する音を録音することが音源の質を高める上で重要である。デジタル化された音はトリミング・ノイズ除去・振幅正規化・ループ処理・鍵盤割り当て・バランス調整などが行われて最終的なデータとなる。

押鍵された鍵に応じた周波数になるように読み出す方法は、電子楽器の1サンプリング時間に進むアドレスの量を制御することによって行われる。たとえば記憶されている音が440Hzであった場合、660Hzの音を発生させるためにアドレスの進む量を1.5にするということである。この値を累算しその整数部が再生すべきデータのアドレスとなる。小数部の値はサンプルの間の値を補間演算して求めるために用いられる。実際の楽器では波形をサンプルしたときのサンプリング周波数と電子楽器のサ

ンプリング周波数の差を補正する必要がある。

PCM方式の電子楽器の周波数の精度を決める要因としては

- 1) 原音の精度 (揺らぎ、非調和、調律など)
- 2) ピッチ発生回路、原理
- 3) 波形テーブルサイズ (ループサイズ)
- 4) 発振周波数精度

などが考えられる。

このうち1)については補正を行うことが可能であるが、自然さを求める場合には揺らぎなどは大切な要素となるので完全になくすことはできない。2)は2-1)で説明したアドレス計算のビット数の問題である。1セントの精度を実現するためには、1セントが約0.06%に相当するため、その差を表すためには小数点以下の桁数が2進数で11桁程度必要となる。また整数部のアドレスは数秒の長さのサンプルを再生可能とするためには18ビット程度は必要となる。あわせて30ビット近くの演算精度が必要になる。またセントとアドレスの関係は非線形なので変換テーブルを用意する必要がある。現在ひとつの音源LSIの発音数が非常に増えているので、これらの回路のスピードや規模との兼ね合いでどの程度の精度にするかは仕様を決める上で重要な検討項目となっている。

3)は正弦波などを波形テーブルを用いて発生させる場合やメモリを節約するためにループを一波で行う場合に生じるものである。たとえば512ポイントと513ポイントでそれぞれ同じアドレス累算量で読み出した場合、約3.4セントの差となる。ピッチが上がれば1波に含まれるサンプル数が少なくなるので誤差は大きくなる。

4)は電子楽器の動きの基準となるクロックを発振する回路の精度であるが、水晶発振の精度はここでは問題にならない程度と考えられる。

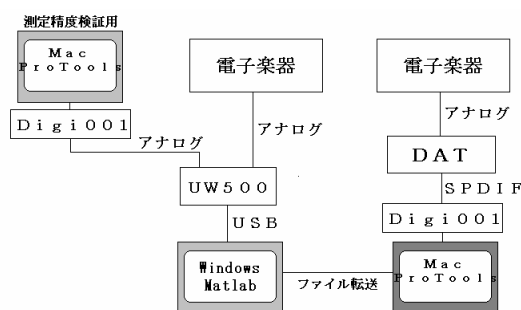


図1. 測定システム図

3. 分析方法

3-1) 分析の手順

分析の系統図を図1に示す。電子楽器の音はヤマハのUW500でデジタル化されUSBを通じてコンピュータに転送される。一部DATで録音したのも用いたが、DATからデジタル的にコンピュータに取り込んでいる。UW500のシステムの精度を調べるためにMatlabを用いて合成したテスト音をUW500を介して取り込み周波数の測定を行った。

周波数の測定はFFTを用いてスペクトルピークから周波数を測定した。周波数軸上のサンプルの間は、ハンニング窓を用いた場合ピーク付近の3点の値から下記の式を用いれば解析的にピークを求めることができる。したがって誤差を計算誤差内に収めることができる¹⁾。図2にこの様子を示す。

$$p = \frac{r_{m-1} - r_{m+1}}{2(r_{m-1} - 2r_m + r_{m+1})}$$

$$f = m + \frac{-3 + \sqrt{9 + 64p^2}}{8p}$$

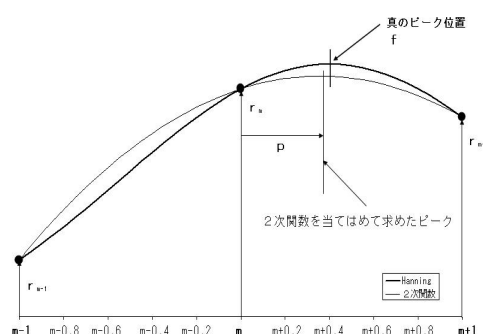


図2 Hanning窓と2次関数の形状の違い

ここで、 r_{m-1} 、 r_m 、 r_{m+1} はピーク付近の3点の振幅値、 f がピークの位置である。テストデータの測定結果を図3に示す。左図の原音と右図のUW500を通して取り込んだ音との差がほとんどないことがわかる。したがってこの系統での測定に問題がないと思われる。低音域での誤差は成分の間のスペクトルの干渉のためと思われるが、1セント以下に収まっているので今回は無視することにした。

3-2) 測定条件

測定は下記の条件で行った。

- ・使用楽器：ヤマハ：CVP-307, p-120, MU2000, SYXG50

ローランド：HP i-5, KR-15, SC-8850, VSC3.23

- ・音色：ピアノ（プログラムナンバー1）、チャーチオルガン（プログラムナンバー20）
- ・ヴェロシティ 120
- ・各種効果器オフ
- ・音高系列
 - A0～A7のオクターブ系列
 - C1～C2の半音階系列
- ・サンプリング周波数
 - 48kHz
- ・分析サイズ
 - A0～A5：65536、
 - A6：32768、A7：16384

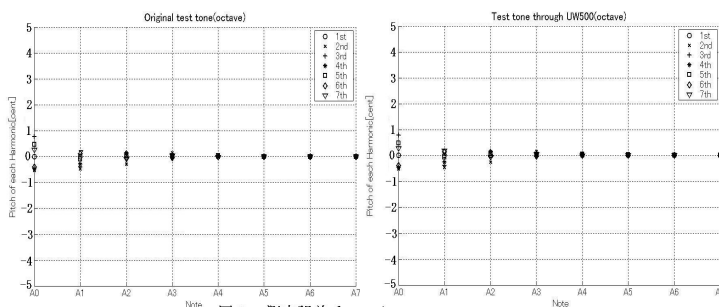


図3. 測定誤差チェック
右図：原音 左図：UWS00を通して録音した音

384

使用楽器のうちHP i-5、KR-15、CVP-307、p-120は電子ピアノ、SC-8850、MU2000はDTM用音源、VSC3.23、SYXG50はソフトウェア音源である。

4. 分析結果

以上の8種類の結果を、ピアノ音色を図4～11、チャーチオルガン音色を図12～19に示す。図20は比較のために行ったピアノ音の測定結果である。これはA4の第2倍音を440Hzに調律したものを測定した。各グラフの0セントは440Hzを基準とした各音名の周波数である。但しオルガン音色ではp-120以外はオクターブ低い周波数が基準となっている。ピアノとチャーチオルガンでそれぞれリアルさを追求した結果、非調和や揺らぎ、カプラー間のピッチずれなども再現されている。調律カーブも実現されているものが多い。オルガンでは音名より1オクターブ下のフィートの音も出ており、それを基準とすると誤差が大きくなってしまいうものもあった。ピアノの低音では基本音のレベルが低く、第2倍音以降から推定したものもある。誤差は10数セントから数セントの範囲に分布している。誤差がある概して周波数の精度に関してはソフトウェア音源のほうがハードの制約がない分精度はよいようである。

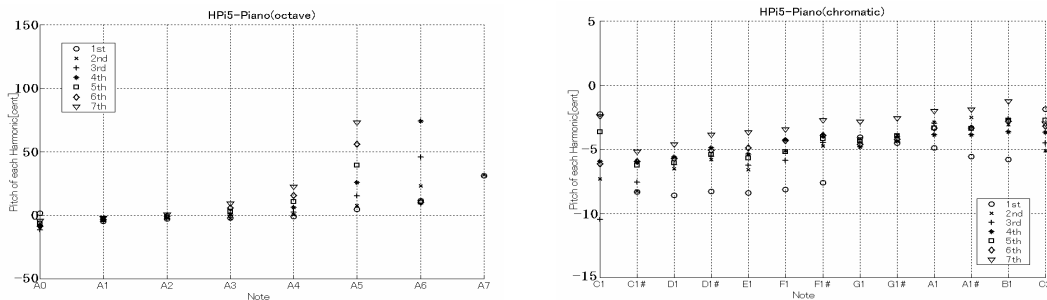


図4. HP i-5の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

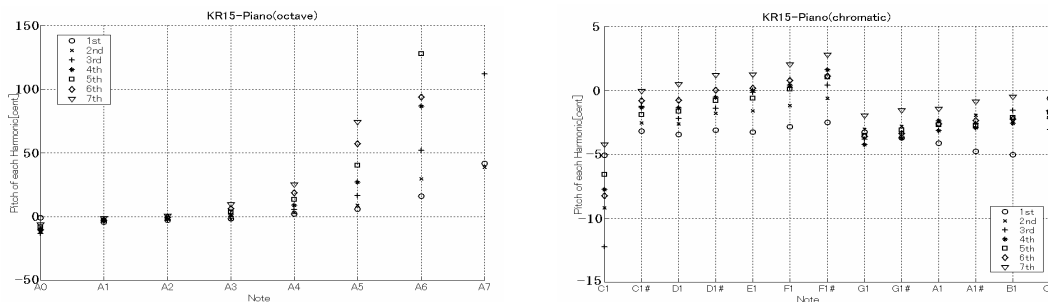


図5. KR-15の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

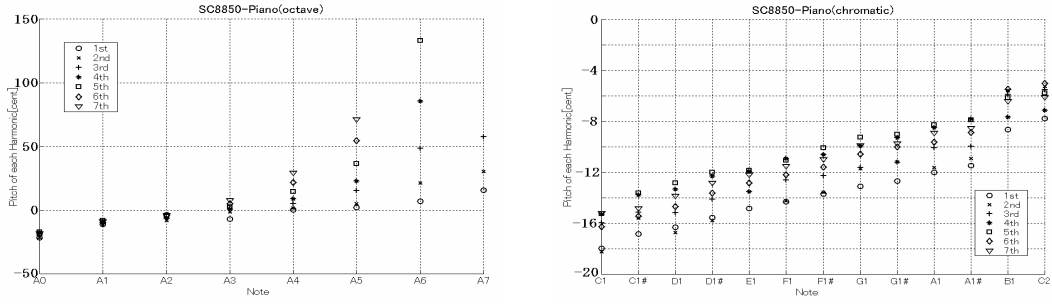


図6. SC-8850の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

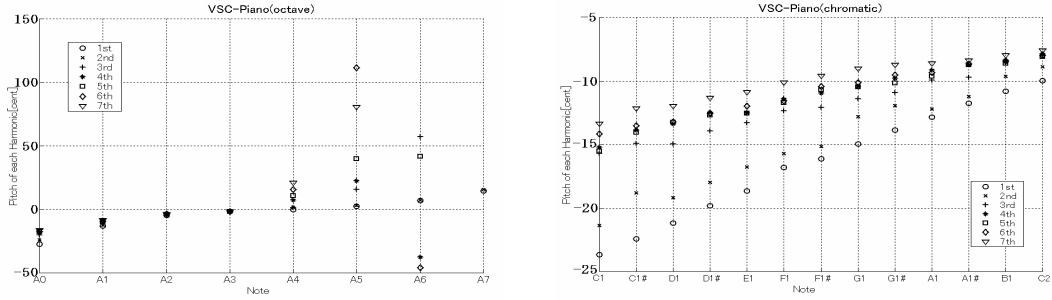


図7. VSC3.23の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

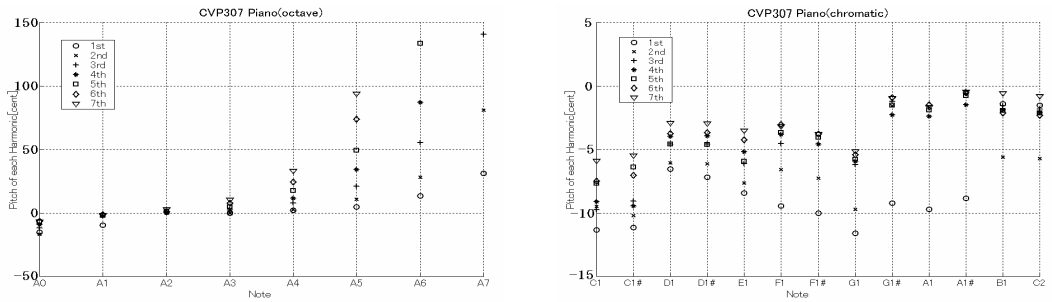


図8. CVP-307の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

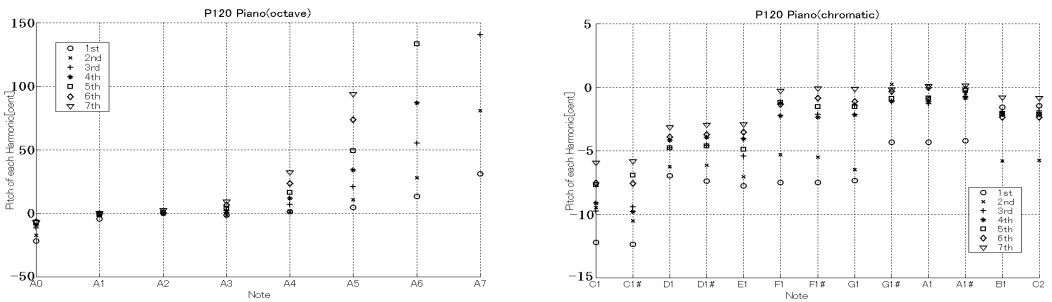


図9. p-120の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

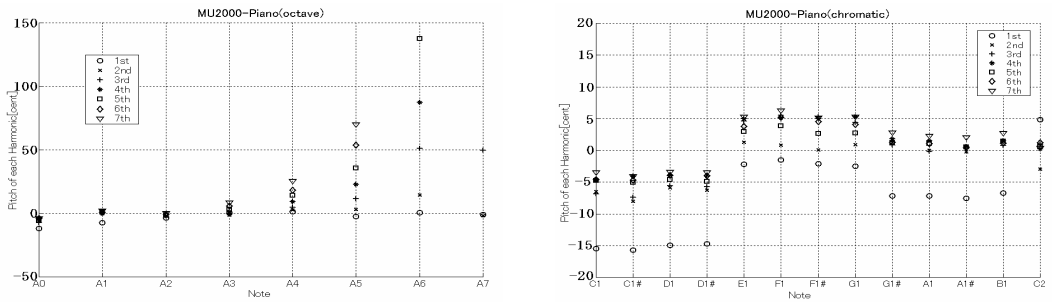


図10. MU2000の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

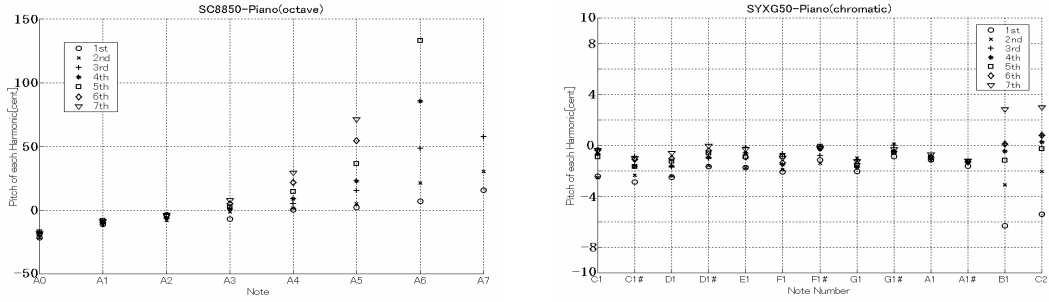


図 1 1. SYXG50の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

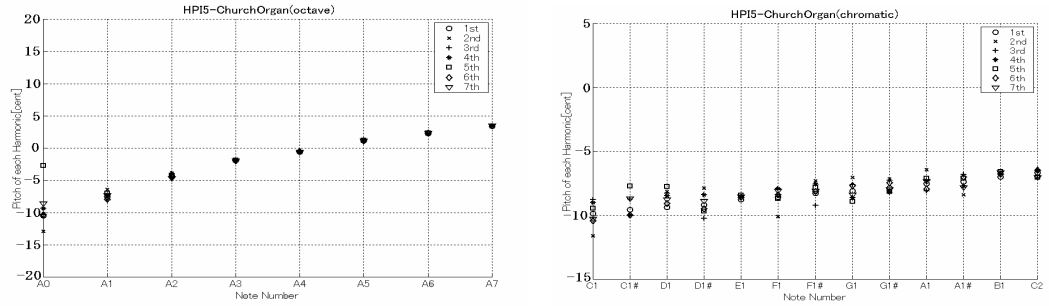


図 1 2. HPi-5の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

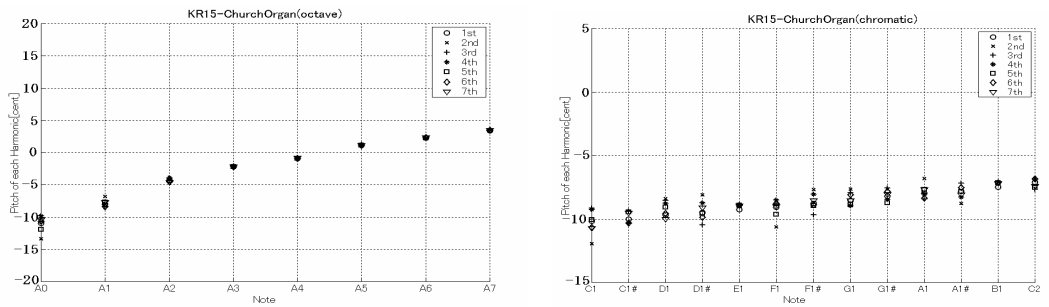


図 1 3. KR-15の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

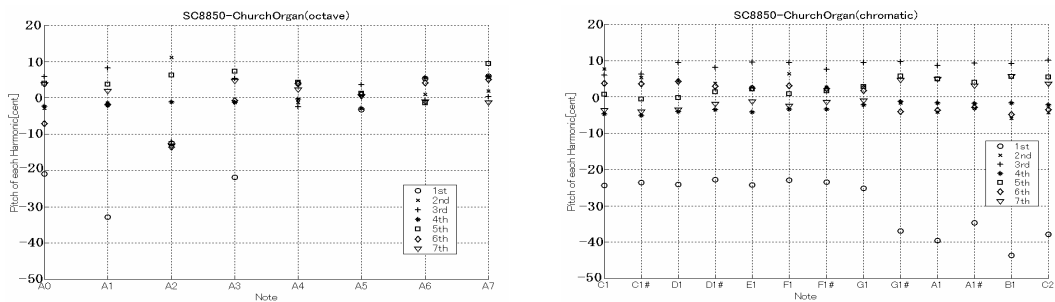


図 1 4. SC-8850の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

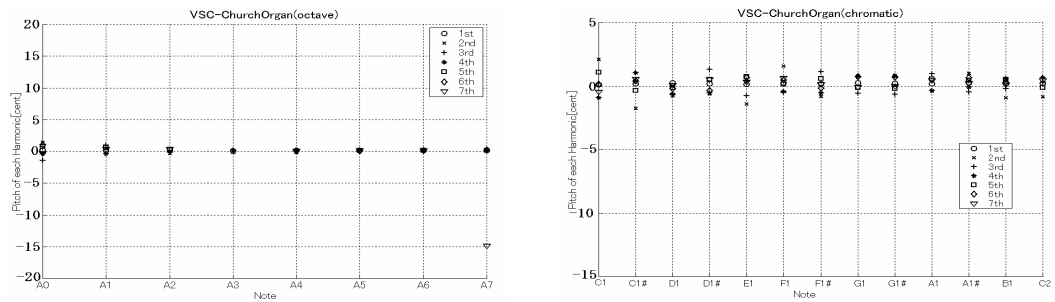


図 1 5. VSC3.23の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

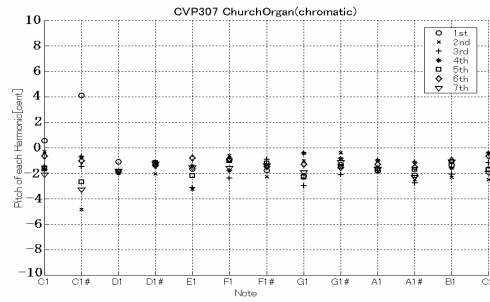
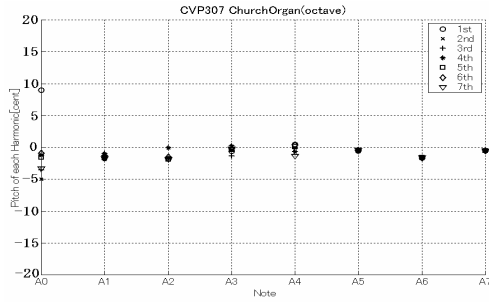


図 16. CVP-307の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

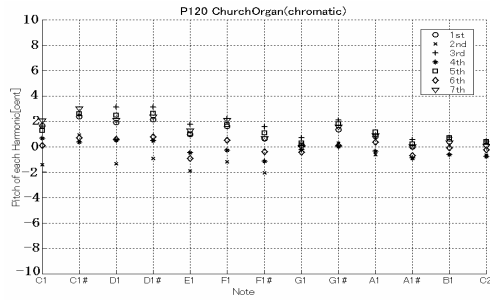
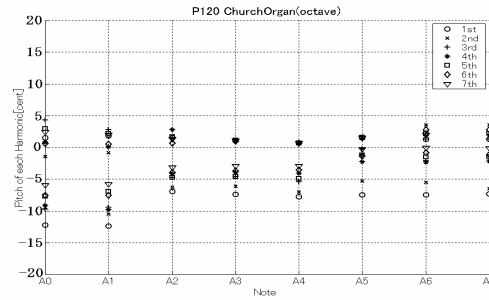


図 17. p-120の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

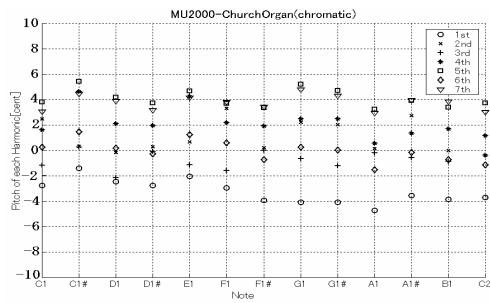
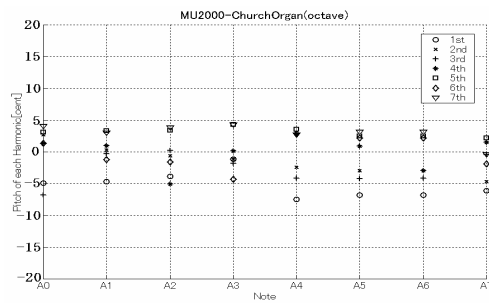


図 18. MU2000の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

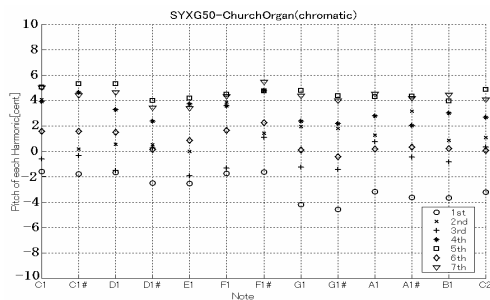
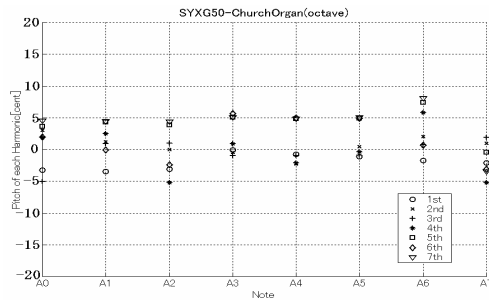


図 19. SYXG50の結果 右：オクターブ系列、左：半音階系列

5. まとめ

電子楽器はその音を自然にしようとする研究開発の結果PCM方式になり飛躍的にその音色が自然楽器に近づいた。またその利便性からさまざまな実験に電子楽器が使われる場面も少なくない。今回調査したようにハードなどの制約などから、ある程度の周波数の誤差を有している。実験に使うに際してはそれらのチェックが必要である。

6. 参考文献

- 1) 加藤充美 「楽音の高精度なピッチ周波数の測定方法について」 MA95-55

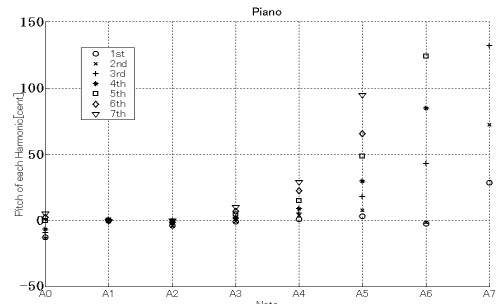


図 20. ピアノの分析結果

A4の第2倍音を440Hzに調律