音の取り扱いに関するメモ (C, Java, Mathematica)

桂田 祐史

2008 年 3 月 6,7 日, 2010 年 3 月, 2013 年 10 月, 2017 年 10 月

http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/text/sound/
私が作ったプログラムは自由に使ってください。無保証ですけど。

2009 年度卒研でも「音」を研究テーマに取り上げた学生がいたので、久しぶりにここに手を入れる予定。

1 目標と計画

(準備中)

買物計画　PCM レコーダー (パソコンを持って起動を待ってサウンドレコーダーは非能率的、やはりデンスケでしょうか, PCM-D50, PCM-M10), 手頃なスピーカー&ヘッドホン (Let's note のスピーカーは、時々本当にとんでもない音が出ます[1]), 色々な音データ

常微分作用素の固有値問題については、横山 [1](他に桂田 [2] を見よ) があるが、いつかもう一度きちんとチャレンジしたい。

いつか、フレッチャー・ロッシング [3] を真面目に読んでチャレンジする学生が出ないかな、と思っている。

城都 [4], [5] くらいの内容は数学的に整理しておきたいと思っている。

音声データについては、2003 年度卒研生の松山周五郎君が録音して集めてくれたデータがあるが (http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/report/open/matsuyama-wave-2014/ で公開中) があるが、もっと色々なものを収集したい。

2014 年から担当している授業のネタに音を入れたので、そのうち再整備しよう。

2 Windows のサウンドレコーダー

(準備中 — と言っているうちに Windows から疎遠になりつつある…多分書くことはないような気がしてきた。)

3 Mathematica でサウンドを扱う

実際の使用例としては、2003 年度卒研生の松山周五郎君の卒業研究レポート [6] が参考になる。

[1] 音を合成するには、信号の和でなくて積を求めるという (情けない) 勘違いを学生がしてしまったくらい。

3.1 注意事項

Mathematica では「振幅」という言葉を通常の物理の本で採用されている意味 (もっとも大きく振れた幅、変位の絶対値の最大値、ということで、$f(t) = A\sin(2\pi f(t-t_0))$ の場合、$|A|$ が振幅である) とは異なる意味で用いている (そのことをはっきりと断った上でのことである)。

Mathematica のマニュアルに曰く

文献によっては，振幅は音のピーク信号強度と定義するものもあるが，本書では，常に，時間の関数である瞬間的な信号強度とする.

3.2 Play[]

時刻 t (単位は秒) における音圧が $\sin 2\pi ft$ である音は、周波数が f[Hz] の音である。Play[] を使うと、この音が鳴らせる。使い方は Plot[] に似ている。

440 Hz の音を鳴らす

```
Play[Sin[2 Pi 440 t],{t,0,1}]
```

なお、デフォールトのサンプリング周波数 (SampleRate) は 8[kHz] である。音楽 CD 品質のサンプリング周波数 (44.1[kHz]) にするには、

音楽 CD 音質で 440Hz の音を鳴らす

```
Play[Sin[2 Pi 440 t],{t,0,1},SampleRate->44100]
```

音を混ぜるのは、単に和を作るだけである。

440Hz, 880Hz, 1320Hz の音を混ぜる

```
ra[a_,b_,c_]:=Play[a*Sin[2 Pi 440 t]+b*Sin[2 Pi 440 2 t]+c*Sin[2 Pi
440 3 t],{t,0,1},SampleRate->44100]
```

ステレオも出来るようである。

```
Play[{Sin[2 Pi 440 t],Sin[2 Pi 880 t]},{t,0,1},SampleRate->44100]
```

うなりの例

```
Play[Sin[2 Pi 440 t] + Sin[2 Pi  (440 - 0.1 t) t], {t, 0, 100}]
```

Mathematica のマニュアルの例 (何だこれは)

```
Play[Sin[700 t + 25 t Sin[350 t]], {t, 0, 4}]
```

和音, ついでに WAVE ファイル domisodo.wav[2]を作成。

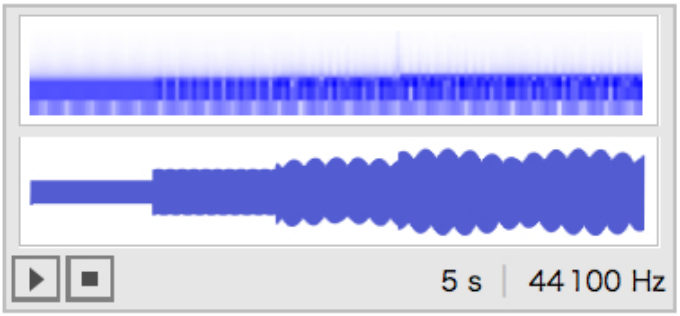
```
c = 2.0^(1/12);
do = 261*2*Pi; mi = c^4 do; so = c^7 do; do2 = 2*do;
snd=Play[Sin[do t]+Boole[t>1]Sin[mi t]+Boole[t>2]Sin[so t]+Boole[t>3]Sin[do2 t],
    {t,0,5}, SampleRate->44100,PlayRange->{-5,5}]
Export["domisodo.wav",snd]
```

```
In[48]:= c = 2.0^(1/12);

In[49]:= do = 261*2*Pi; mi = c^4 do; so = c^7 do;
         do2 = 2*do;

In[50]:= snd = Play[Sin[do t] + Boole[t > 1] Sin[mi t] +
             Boole[t > 2] Sin[so t] + Boole[t > 3] Sin[do2 t],
           {t, 0, 5}, SampleRate → 44 100, PlayRange → {-5, 5}]
```

Out[50]=




```
In[51]:= Export["domisodo.wav", snd]

Out[51]= domisodo.wav
```

(PlayRange->{} を入れないと音が割れてしまう。この辺は良く分らない。Export[] が気が利かないのかも。)

3.3 ListPlay[]

ListPlay[] を用いると、数値リストを音に変換出来る。

Play[] の例にあげた Play[Sin 2 Pi 440 t],{t,0,1}] と同様のことを、自分でサンプリングして行うには、

440Hz の音を鳴らす

```
s=Table[Sin[2 Pi 440 t],{t,0,1.0,1.0/8000}];
ListPlay[s]
```

(ListPlay[] のデフォールトのサンプリング・レートが 8 kHz なので、1/8000 という間隔でサンプリングしているわけである。)

音楽 CD 音質で 440Hz の音を鳴らす

```
mysamplerate = 44100
s=Table[Sin[2 Pi 440 t],{t,0,1.0,1.0/mysamplerate}];
ListPlay[s, SampleRate->mysamplerate]
```

3.4 Import[] によるサウンド・ファイルの読み込み

(2017/11/29 加筆: 従来は、単に Import[ファイル名] としてサウンド・ファイルを読み込んでいたが、Mathematica 11 からは、Import[ファイル名, "Sound"] と "Sound" を指定しないと、以下の説明の多くが当てはまらなくなった。)

Import[] で画像ファイルやサウンド・ファイルの入力が可能である。
例えば WAVE ファイルを読み込んで、サウンド・データとして変数に格納できる。

```
SetDirectory["C:/Document and Settings/mk/デスクトップ"]
snd = Import["piano.wav","Sound"]
```

サウンドである snd は、Show[snd] などで再生できる (単に snd を評価しても良い)。

- snd はリストであるが、Length[snd] は 1 である (snd[[2]] は存在しない)。
- snd[[1]] はリストであるが、Length[snd[[1]]] は 2 である。
- snd[[1,2]] はサンプリング周波数 (SampleRate) である。
- Length[snd[[1,1]]] はチャンネル数に等しい。1 ならばモノラルで、2 ならばステレオである。
- snd[[1,1,1]] は数値のリストである。snd[[1,1,2]] も存在するならば (ステレオならば) 数値のリスト。

図示すると

```
snd = {
        {
          {
            {l1,l2,...,lN},          <-  snd[[1,1,1]]
            {r1,r2,...,rN}           <-  snd[[1,1,2]]
          },
          SampleRate                 <-  snd[[1,2]]
        }
      }
```

残念ながら単なるリストでないので、

これは出来ない

```
{{{leftChannel,rightChannel},samplingRate}} = snd;
```

のような代入はさせてもらえないが、例えば

```
leftChannel=snd[[1,1,1]]; rightChannel=snd[[1,1,2]]; samplingRate=snd[[1,2]]
```

あるいは

```
{{leftChannel,rightChannel},samplingRate}={snd[[1,1]],snd[[1,2]]}
```

とすると、左チャンネルの数値データ leftChannel, 右チャンネルの数値データ rightChannel, サンプリング周波数 samplingRate が得られる。

ListPlay[] で再生してみる

```
snd=Import["WAVE ファイル名","Sound"];
ListPlay[snd[[1,1,1]],SampleRate->snd[[1,2]]]
 あるいは
ListPlay[snd[[1,1]],SampleRate->snd[[1,2]]]
```

最近の Mathematica では、項目 (要素名) を指定した読み込みが可能である。

どういう項目があるか

```
Import["piano.wav","Elements"]
```

とすると

```
{"AudioChannels", "AudioEncoding", "Data", "SampledSoundList", "SampleRate", "Sound"}
```

という結果を返す。

チャンネルの数

```
numofchannels=Import["piano.wav","AudioChannels"]
```

これは多分 `numofchannels=Length[Import["piano.wav"][[1,1]]]` と同じ。

1 とか 2 とか、チャンネル数を返す。つまりステレオならば 2, モノラルならば 1 である。

エンコードの方法

```
Import["piano.wav","AudioEncoding"]
```

UnsiginedInteger8 のような形式を返す。まあ、これは Mathematica が抽象化してくれていて、あまり気にならないところ (C でプログラムを書く時は面倒だ)。

サンプリング周波数

```
samplingrate=Import["piano.wav","SampleRate"]
```

これは多分 `samplingrate=Import["piano.wav"][[1,2]]` と同じ。

44010 のようなサンプリング周波数を返す。

```
snd = Import["piano.wav","Sound"]
```

これは多分 `snd = Import["piano.wav"]` と同じ。

```
data=Import["piano.wav","Data"];
```

これは多分 `data=Import["piano.wav"][[1,1]];` と同じ。

```
s=Import["piano.wav","SampledSoundList"];
```

これは多分 `data=Import["piano.wav"][[1]];` と同じ。

「同じ」と言ったものは、`Equal[]` で確認できる。
あまり使用経験はないが、ほぼ裏返しの `Export[]` が使える。

3.5 `Fourier[]` による離散 Fourier 変換

(考えてみたら、周期を一般の T とした式を書くべきだな…)
Mathematica には、離散フーリエ変換をするための `Fourier[ ]` がある。

周期 2π の周期関数 $u\colon \mathbf{R} \to \mathbf{C}$ があるとき、区間 $[0, 2\pi]$ の N 等分点

$$t_j = \frac{2\pi(j-1)}{N} \quad (j = 1, 2, \cdots, N) \tag{1}$$

における u の値

$$u_j := u(t_j) \quad (j = 1, 2, \cdots, N) \tag{2}$$

が得られたとする。このとき、u の複素 Fourier 係数

$$c_k := \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(t) e^{-ikt}\, dt \quad (k \in \mathbf{Z}) \tag{3}$$

を台形則で近似したものを C_k とすると、

$$C_k = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^{N} u(t_j) e^{-ikt_j} \cdot \frac{2\pi}{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} u_j \exp\left(-\frac{2\pi i(j-1)k}{N}\right) \quad (k \in \mathbf{Z}). \tag{4}$$

`InverseFourier[]` という逆変換が用意されている。

簡単に証明できる良く知られた事実

- 普通の Fourier 係数

  $$a_k := \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos kt\, dt, \quad b_k := \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin kt\, dt \quad (k \in \mathbf{Z},\ k \geq 0) \tag{5}$$

  と複素 Fourier 係数との間に、

  $$c_0 = \frac{a_0}{2}, \quad c_k = \begin{cases} \dfrac{a_k - ib_k}{2} & (k \geq 1) \\ \dfrac{a_{-k} + ib_{-k}}{2} & (k \leq -1) \end{cases} \tag{6}$$

  という関係がある ($\{a_k\}$, $\{b_k\}$ から $\{c_k\}$ を求めるのに使える)。言い替えると (こちらは $\{c_k\}$ から $\{a_j\}$, $\{b_k\}$ を求めるのに使える)

  $$a_0 = 2c_0, \quad a_k = c_k + c_{-k}, \quad b_k = i(c_k - c_{-k}) \quad (k \in \mathbf{N}). \tag{7}$$

  特に u が実数値関数の場合、$\{a_k\}$ と $\{b_k\}$ は実数列であるから、$c_{-k} = \overline{c_k}$ が成り立ち (特に c_0 は実数)、

  $$a_0 = 2c_0 = 2\,\mathrm{Re}\, c_0, \quad a_k = 2\,\mathrm{Re}\, c_k, \quad b_k = -2\,\mathrm{Im}\, c_k \quad (k \in \mathbf{N}). \tag{8}$$

- $\{C_k\}$ は周期 N の周期数列である: $C_{k+N} = C_k$ $(k \in \mathbf{Z})$.
- $|k| \ll N/2$ のとき、C_k は c_k の "良い近似" である。$0 \leq k \ll N/2$ のとき

  $$c_k \simeq C_k, \quad c_{-k} \simeq C_{-k} = C_{N-k}. \tag{9}$$

  (a_k, b_k の近似が必要な場合) $1 \leq k \ll N/2$ のとき、

  $$a_0 \simeq 2C_0, \quad a_k \simeq C_k + C_{-k} = C_k + C_{N-k}, \quad b_k \simeq i(C_k - C_{-k}) = i(C_k - C_{N-k}). \tag{10}$$

Mathematica では、長さ N のリスト `u=`$\{u_1, \ldots, u_N\}$ があるとき、

```
v=Fourier[u,FourierParameters->{a,b}]
```

とすると、

$$v_s := \frac{1}{N^{(1-a)/2}} \sum_{r=1}^{N} u_r \exp\left(\frac{2\pi i b(r-1)(s-1)}{N}\right) \quad (s = 1, 2, \ldots, N)$$

で定まる $v_1, \ldots, v_N$ を並べたリスト v が得られる。`,FourierParameters->{a,b}` を省略して単に `v=Fourier[u]` とすると、$(a, b) = (0, 1)$ と指定したのと同じになる (いわゆる "default")。

特に

```
v=Fourier[u,FourierParameters->{-1,-1}]
```

とすると、

$$v_s := \frac{1}{N} \sum_{r=1}^{N} u_r \exp\left(-\frac{2\pi i(r-1)(s-1)}{N}\right) = C_{s-1} \quad (s = 1, 2, \ldots, N).$$

すなわち

$$\mathrm{v} = \{C_0, \cdots, C_{N-1}\}.$$

三角級数の係数を再生

```
a0 = 1

a = {1, 2, 3, 4, 5}

b = {6, 7, 8, 9, 10}

u[t_]:=a0/2+a . Table[Cos[n t],{n,Length[a]}]+b . Table[Sin[n t],{n,Length[b]}]

n = 12

ts = Table[2 Pi (j - 1)/n, {j, n}];

us = u[ts];

cs = Fourier[us, FourierParameters -> {-1, -1}]

A0 = 2 cs[[1]]

A = Table[cs[[k + 1]] + cs[[n - k + 1]], {k, 5}]

B = I Table[cs[[k + 1]] - cs[[n - k + 1]], {k, 5}]
```

3.6 解析例

2009 年度卒業研究 (山田祐二君) の例。アコースティック・ギターの 5 弦 3 フレットを抑えて弾いた音を録音した WAVE ファイル (サンプリング周波数 44.1kHz, 量子化ビット数 16, ス

テレオ, という形式) の、62800 個目の数値 (ファイルの最初から 62800/44100 ≒ 1.42 秒後) から 1 秒分を離散 Fourier 変換した。129Hz, 258Hz, 388Hz, 776Hz, 646Hz にピークがある。

```
SetDirectory["c:/Documents and Settings/ユーザー名/デスクトップ/どこか"]

wavFourier[snd_,start_] :=
  Abs[Fourier[Take[snd[[1,1,1]],{start,start+snd[[1,2]]-1}]]]

plotSpectrum[spec_] :=
  ListPlot[spec,PlotJoined->True,PlotRange->{{1,1600},All}]

peakPositions[spec_,n_] :=
  Module[{pp,pps,halfspec},
    pps={}; halfspec=Take[spec,Floor[Length[spec]/2]];
    For[i=1,i<=n,i++,
         pp=Ordering[halfspec,-1][[1]];
         pps = Append[pps,pp];
         For[j=-6,j<=6,j++,halfspec[[pp+j]]=0]
       ];
    pps
  ]

peakBar[spec_,pps_]:=BarChart[spec[[Sort[pps]]],ChartLabels->Sort[pps]-1]

sounddata=Import["guitar1.wav"];
aft=wavFourier[sounddata,62800];
g1=plotSpectrum[aft]
pps=peakPositions[aft,5]
  結果は {130, 259, 389, 777, 647}

g2=peakBar[aft,pps]

  解析位置
For[s = 40000, s <= 80000, s += 2000,
  Print[peakPositions[wavFourier[Import["guitar1.wav"], s], 5]]]
```

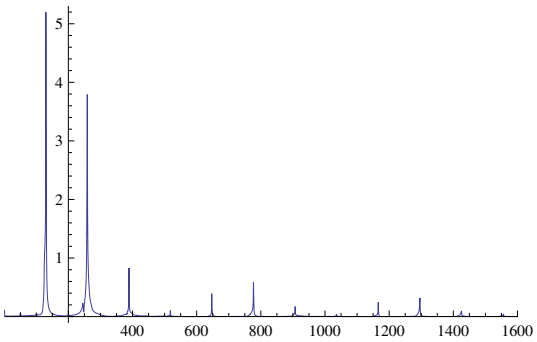


図 1: guitar1.wav のスペクトル, 129,258,388,776,646 にピーク

プログラムは色々改良の余地がある。どこから解析するか指示する start の単位は秒にすべきかも。

3.7 その他 (新しめの機能？)

- Speak["Hello, how are you?"]
- Sound[]

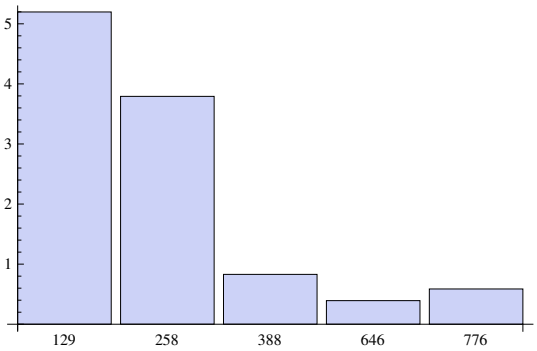


図 2: guitar1.wav のスペクトル 5 つのピーク

- SampledSoundList[]
- SoundNote[] — 楽音を出す (色々な楽器の音が出せる)
- EmitSound[] — 音を出す (最近の Mathematica は、再生ボタンを押すと音を発するようなウィンドウを作るが、そうしないですぐに音を発する)
- SystemDialogInput["RecordSound"] — 図 3 を見れば一目瞭然
  これは古い Windows だからと思って、Mac でやろうとして、まだ成功していない。

  > "RecordSound"はすべてのプラットフォームでサポートされている訳ではない.

  と書いてあるけれど、Mac ではどうなのだろう？

ピアノでドミソド, フルートで和音

```
EmitSound[
  Sound[{SoundNote["C4"],SoundNote["E4"],SoundNote["G4"],SoundNote["C5"],
         SoundNote[{"C4","E4","G4","C5"},1,"Flute"]}]
]
```

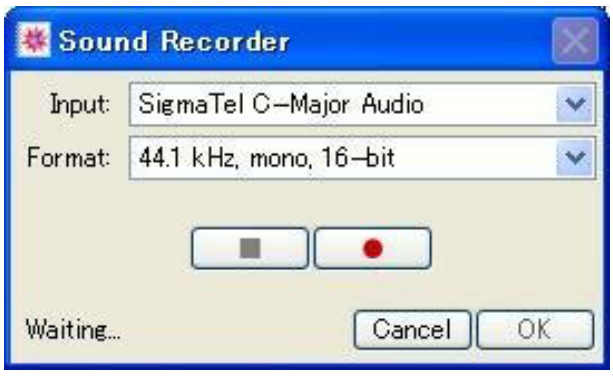


図 3: Mathematica の Sound Recorder

4 C で WAVE ファイルを扱う

4.1 参考にした情報

http://homepage3.nifty.com/ryuz/programing/wavefmt.html に書いてある情報を参考

にして、WAVE ファイルの読み書きをするプログラムを C で書いた。

この時は気が付かなかったが、『WAV ファイルフォーマット』[3] という WWW ページがあって、これが良さそう。

なお、C で FFT をするには、『Ooura's Mathematical Software Packages』[4] にある大浦 FFT を使うのがお勧め。

4.2 拙作 readwave.c (WAVE →テキスト・ファイル)

http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/program/sound/readwave.c
やっつけの、リバースエンジニアリングの、あまり人に見せたくない…

ピアノの音を録音した piano.wav[5] という WAVE ファイルの内容をテキスト・ファイルに変換してみる。

```
oyabun% gcc -o readwave readwave.c
oyabun% ./readwave piano.wav piano.txt
oyabun% ./readwave piano.wav > piano2.txt
```

```
oyabun% ls -l piano.wav piano.txt piano2.txt
-rw-r--r--   1 mk       lab00    2814838  3月  6日  13:44 piano.txt
-rw-r--r--   1 mk       lab00    2828151  3月  6日  13:49 piano2.txt
-rw-r--r--   1 mk       lab00    1234592  1月 23日  20:39 piano.wav
oyabun% head piano.txt
#original file: piano.wav
#number of channels: 2
#sampling rate: 44100
#number of bits (per sample): 16
#number of samples: 307017
64 64
62 62
65 62
65 63
65 60
```

[3] http://www.kk.iij4u.or.jp/~kondo/wave/index.html
[4] http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~ooura/index-j.html
[5] http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/text/sound-files/piano.wav

piano2.txt (少し冗長)

```
# RIFF データのサイズ=1234584
# fmt データのサイズ=18
#  01 00 02 00 44 ac 00 00 10 b1 02 00 04 00 10 00
#  00 00
# 非圧縮 PCM です。
# ステレオです。
# サンプリング・レート (標本化周波数)=44100
# 1 秒当りのバイト数=176400
# ブロック境界=4
# ビット数/サンプル=16
# 拡張情報サイズ=0
# PAD チャンクがあります。# PAD チャンクのサイズ=4042
#  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
 (中略)
#  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
# fact チャンクがあります。# fact データのサイズ=4
#  49 af 04 00
# data データのサイズ=1228068
#original file: piano.wav
#number of channels: 2
#sampling rate: 44100
#number of bits (per sample): 16
#number of samples: 307017
64 64
62 62
  (中略 --- 結構長い)
-114 -63
-111 -59
-112 -61
-109 -53
-108 -51
```

```
 1  /*
 2   * readwave.c --- 無圧縮 WAVE ファイルを読んでテキスト・ファイルにする
 3   *                動作することはまったく保証しません
 4   *
 5   *  version 2 (2003/12/21)
 6   *  version 3 (2005/7/4) "PAD " チャンクの存在を知りそれに対応
 7   *  version 4 (2013/10/26) #include 増やした。文字コードを UTF8 にした。
 8   *  version 5 (2014/8/12)  FLLR チャンクの存在を知りそれに対応
 9   *  version 5.1 (2017/10/9)  www.math.meiji.ac.jp を変える
10   *
11   *  コンパイル: gcc -o readwave readwave.c
12   *
13   *  使い方:
14   *   (1) ./readwave <WAVE ファイル名> <テキスト・ファイル名>
15   *   (2) ./readwave <WAVE ファイル名>
16   *          標準出力に出力
17   *   (3) ./readwave
18   *          標準入力から入力、標準出力に出力
19   *
20   *  入手:
21   *    http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/program/
22   *
23   *  参考にした情報
24   *   URL: http://member.nifty.ne.jp/Ryuz/programing/wavefmt.html
25   *        -> http://homepage3.nifty.com/ryuz/programing/wavefmt.html
26   *
27   *  普段置いてある場所
28   *    ~/Sotsuken/2007/sound/readwave/
29   */
```

```
30
31  #include <stdio.h>
32  #include <stdlib.h>
33  #include <string.h>
34
35  const int verbose = 0;
36  const int debug = 0;
37  FILE *out;
38
39  void usage(char *prog)
40  {
41    fprintf(stderr, "usage (1): %s\n", prog);
42    fprintf(stderr, "usage (2): %s <wave-file-name>\n", prog);
43    fprintf(stderr, "usage (3): %s <wave-file-name> <text-file-name>\n", prog);
44    exit(0);
45  }
46
47  void setstring(unsigned char *buf, FILE *in, int n)
48  {
49    int i;
50    for (i = 0; i < n; i++)
51      buf[i] = getc(in);
52    buf[n] = 0;
53  }
54
55  int readint(FILE *in)
56  {
57    int c1, c2, c3, c4;
58    c1 = getc(in); c2 = getc(in); c3 = getc(in); c4 = getc(in);
59    return c1 + 256 * (c2 + 256 * (c3 + 256 * c4));
60  }
61
62  int checkstring(unsigned char *buf, char *key)
63  {
64    int i, n = strlen(key);
65    for (i = 0; i < n; i++)
66      if (buf[i] != key[i]) {
67        fprintf(stderr, "%s は \"%s\" と一致しない\n", buf, key);
68        exit(1);
69      }
70    return 0;
71  }
72
73  void dump(unsigned char *buf, int n)
74  {
75    int i;
76    printf("# ");
77    for (i = 0; i < n; i++) {
78      printf(" %02x", buf[i]);
79      if ((i + 1) % 16 == 0)
80        printf("\n# ");
81    }
82    printf("\n");
83  }
84
85  int read2byte(unsigned char *buf)
86  {
87    return buf[0] + 256 * buf[1];
88  }
89
90  int read1(FILE *in)
91  {
92    int c = getc(in);
```

```
 93    if (debug) {
 94      printf("%02x ", c);
 95      fprintf(out, "%02x ", c);
 96    }
 97    return c;
 98  }
 99
100  int read2(FILE *in)
101  {
102    int c1, c2, c;
103    c1 = getc(in); c2 = getc(in);
104    if (debug) {
105      printf("%02x %02x ", c1, c2);
106      fprintf(out, "%02x %02x ", c1, c2);
107    }
108    c = c1 + (c2 << 8);
109    if (c >= 32768)
110      c -= 65536;
111    return c;
112  }
113
114  int read4byte(unsigned char *buf)
115  {
116    return buf[0] + 256 * (buf[1] + 256 * (buf[2] + 256 * buf[3]));
117  }
118
119  void analyze(unsigned char *buf,
120               int *fmt_tag, int *num_channel, int *sampling_rate,
121               int *bytes_per_seconds, int *block, int *num_bits,
122               int *extended_information_size)
123  {
124    *fmt_tag = read2byte(buf);
125    *num_channel = read2byte(buf + 2);
126    *sampling_rate = read4byte(buf + 4);
127    *bytes_per_seconds = read4byte(buf + 8);
128    *block = read2byte(buf + 12);
129    *num_bits = read2byte(buf + 14);
130    *extended_information_size = read2byte(buf + 16);
131  }
132
133  void readpcm(FILE *in, int size, int bits, int channel)
134  {
135    int i, c, right;
136    if (bits == 16) {
137      if (channel == 2) {
138        for (i = 0; i < size / 4; i++) {
139          c = read2(in); right = read2(in);
140          if (verbose) printf("%d %d\n", c, right);
141          fprintf(out, "%d %d\n", c, right);
142        }
143      }
144      else {
145        for (i = 0; i < size / 2; i++) {
146          c = read2(in);
147          if (verbose) printf("%d\n", c);
148          fprintf(out, "%d\n", c);
149        }
150      }
151    }
152    else {
153      if (channel == 2) {
154        for (i = 0; i < size / 2; i++) {
155          c = read1(in); right = read1(in);
```

```
156         if (verbose) printf("%d %d\n", c, right);
157         fprintf(out, "%d %d\n", c, right);
158       }
159     }
160     else {
161       for (i = 0; i < size; i++) {
162         c = read1(in);
163         if (verbose) printf("%d\n", c);
164         fprintf(out, "%d\n", c);
165       }
166     }
167   }
168 }
169
170 /* 取り扱うファイルの名前 */
171 char *input_fname, *output_fname, *prog_name;
172
173 int main(int argc, char **argv)
174 {
175   int size;
176   FILE *in;
177   unsigned char buf[5120];
178   int fmt_tag, num_channel, sampling_rate, bytes_per_seconds;
179   int block, num_bits, extended_information_size;
180
181   prog_name = argv[0];
182   if (argc > 3)
183     usage(prog_name);
184
185   if (argc == 3) {
186     output_fname = argv[2];
187     if ((out = fopen(output_fname, "w")) == NULL) {
188       fprintf(stderr, "%s がオープンできません。\n", output_fname);
189       exit(1);
190     }
191   }
192   else {
193       output_fname = "stdout";
194       out = stdout;
195   }
196   if (argc >= 2) {
197     input_fname = argv[1];
198     if ((in = fopen(input_fname, "r")) == NULL) {
199       fprintf(stderr, "%s がオープンできません。\n", input_fname);
200       exit(1);
201     }
202   }
203   else {
204     input_fname = "input"; in = stdin;
205   }
206
207   /* ヘッダーを読む */
208   setstring(buf, in, 4); checkstring(buf, "RIFF");
209   size = readint(in); printf("# RIFF データのサイズ=%d\n", size);
210   setstring(buf, in, 4); checkstring(buf, "WAVE");
211   setstring(buf, in, 4); checkstring(buf, "fmt ");
212   size = readint(in); printf("# fmt データのサイズ=%d\n", size);
213   setstring(buf, in, size); dump(buf, size);
214   analyze(buf, &fmt_tag, &num_channel, &sampling_rate,
215           &bytes_per_seconds, &block, &num_bits,
216           &extended_information_size);
217   printf("# 非圧縮 PCM%s。\n", (fmt_tag == 1) ? "です" : "ではありません");
218   printf("# %s です。\n", (num_channel == 1) ? "モノラル" : "ステレオ");
```

```
219    printf("# サンプリング・レート (標本化周波数)=%d\n", sampling_rate);
220    printf("# 1 秒当りのバイト数=%d\n", bytes_per_seconds);
221    printf("# ブロック境界=%d\n", block);
222    printf("# ビット数/サンプル=%d\n", num_bits);
223    printf("# 拡張情報サイズ=%d\n", extended_information_size);
224    setstring(buf, in, 4);
225    /* 以下の if を書き加えた (2005/7/4) */
226    if (strcmp(buf, "PAD ") == 0) {
227      printf("# PAD チャンクがあります。");
228      size = readint(in); printf("# PAD チャンクのサイズ=%d\n", size);
229      setstring(buf, in, size);
230      dump(buf, size);
231      setstring(buf, in, 4);
232    }
233    if (strcmp(buf, "fact") == 0) {
234      printf("# fact チャンクがあります。");
235      size = readint(in); printf("# fact データのサイズ=%d\n", size);
236  #ifdef OLD
237      setstring(buf, in, 4);  /* 多分 BUG */
238  #else
239      setstring(buf, in, size);
240  #endif
241      dump(buf, size);
242      setstring(buf, in, 4);
243    }
244    /* */
245    if (strcmp(buf, "FLLR") == 0) {
246      printf("# FLLR チャンクがあります。");
247      size = readint(in); printf("# FLLR データのサイズ=%d\n", size);
248      setstring(buf, in, size);
249      dump(buf, size);
250      setstring(buf, in, 4);
251    }
252    /* */
253    checkstring(buf, "data");
254    size = readint(in); printf("# data データのサイズ=%d\n", size);
255
256    /* 書き出す */
257    fprintf(out, "#original file: %s\n", input_fname);
258    fprintf(out, "#number of channels: %d\n", num_channel);
259    fprintf(out, "#sampling rate: %d\n", sampling_rate);
260    fprintf(out, "#number of bits (per sample): %d\n", num_bits);
261    fprintf(out, "#number of samples: %d\n",
262            size / num_channel / (num_bits / 8));
263    readpcm(in, size, num_bits, num_channel);
264    fclose(out);
265
266    return 0;
267  }
```

4.2.1 音の波形 (音圧の時間変化) を見る

```
oyabun% ./readwave piano.wav > piano.txt
oyabun% gawk '(NR>=40000 && NR< 41000) {print NR,$1,$2}' piano.txt > piano2.txt
oyabun% gnuplot
gnuplot> plot "piano2.txt" with lines
```

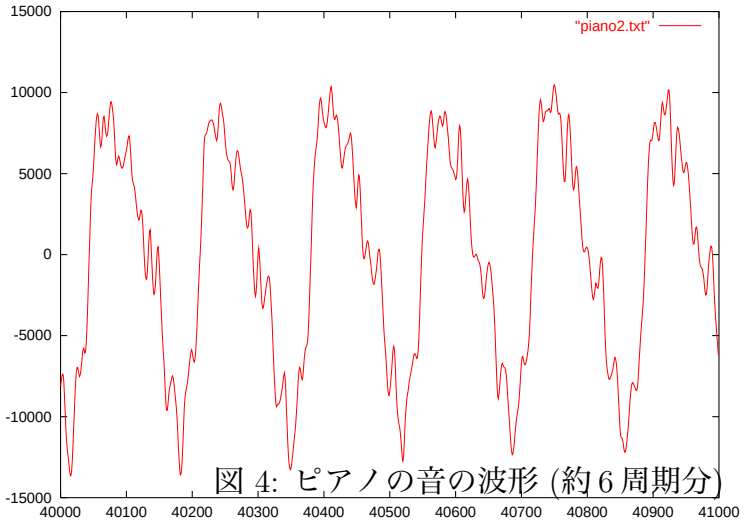


図 4: ピアノの音の波形 (約 6 周期分)

4.3 拙作 writewave.c (テキスト・ファイル→ WAVE)

writewave は、readwave の出力を読んで WAVE ファイルを作成する。(完全な逆変換と言うわけではなく、ヘッダーが軽くなります。)

http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/program/sound/writewave.c

コンパイルと色々な使い方

```
oyabun% gcc -o writewave writewave.c
oyabun% ./readwave piano.wav piano.txt
oyabun% ./readwave piano.wav > piano2.txt
oyabun% ./writewave piano.txt piano1.wav
oyabun% ./writewave piano2.txt > piano2.wav
oyabun% ./readwave piano.wav | ./writewave > piano3.wav
```

```
 1  /*
 2   * writewave.c --- 無圧縮 PCM データ (テキスト・ファイル) から WAVE ファイルを作る
 3   *  version 1 (2003/12/21)
 4   *  version 2 (2013/10/26)
 5   *    ラベルの後に ; を入れた (コンパイル・エラー回避)。
 6   *    文字コードを UTF8 にした。
 7   *
 8   *  コンパイル: gcc -o writewave writewave.c
 9   *
10   *  使い方:
11   *   (1): ./writewave <テキスト・ファイル名> <WAVE ファイル名>
12   *   (2): ./writewave <テキスト・ファイル名>
13   *            標準出力に出力
14   *   (3): ./writewave
15   *            標準入力から入力、標準出力に出力
16   *
17   *  入手:
18   *    http://www.math.meiji.ac.jp/~mk/program/
19   *
20   *  参考にした情報
21   *   URL: http://member.nifty.ne.jp/Ryuz/programing/wavefmt.html
22   *        -> http://homepage3.nifty.com/ryuz/programing/wavefmt.html
23   *
24   *  普段置いてある場所
```

```
25   *    ~/Sotsuken/2007/sound/readwave/
26   */
27
28  #include <stdio.h>
29  #include <stdlib.h>
30  #include <strings.h>
31
32  int verbose = 1;
33
34  #define fwrite16(out,n) {fputc((n)&0xff,(out));fputc(((n)>>8)&0xff,(out));}
35
36  #define fwrite32(out,n) {fputc((n)&0xff,(out));fputc(((n)>>8)&0xff,(out));\
37  fputc(((n)>>16)&0xff,(out));fputc(((n)>>24)&0xff,(out));}
38
39  void usage(char *prog_name)
40  {
41    fprintf(stderr, "usage: %s <txt-file> <wave-file>", prog_name);
42    exit(1);
43  }
44
45  int main(int argc, char **argv)
46  {
47    int num_channels, num_bits, num_samples, sampling_rate;
48    FILE *in,*out;
49    char buf[4096], original_fname[1024];
50    char *prog_name, *input_fname, *output_fname;
51    int left, right, c;
52    int ready = 0, len;
53    int fmt_size, fmt_tag, bytes_per_seconds, block, extended_information_size,
54      data_size, riff_size;
55    static char label[5][32] =
56    {"#original file: ",
57     "#number of channels: ",
58     "#number of bits (per sample): ",
59     "#number of samples: ", "#sampling rate: "};
60
61    prog_name = argv[0];
62
63    if (argc > 3) {
64      usage(prog_name);
65    }
66    if (argc == 3) {
67      output_fname = argv[2];
68      if ((out = fopen(output_fname, "w")) == NULL) {
69        fprintf(stderr, "出力ファイル %s がオープンできません。\n",
70                output_fname);
71        exit(1);
72      }
73    }
74    else {
75      output_fname = "stdout";
76      out = stdout;
77    }
78    if (argc >= 2) {
79      input_fname = argv[1];
80      if ((in = fopen(input_fname, "r")) == NULL) {
81        fprintf(stderr, "入力ファイル %s がオープンできません。",
82                input_fname);
83        exit(1);
84      }
85    }
86    else {
87      input_fname = "stdin";
```

```
 88      in = stdin;
 89    }
 90    while (fgets(buf, sizeof(buf), in) != NULL) {
 91      if (buf[0] == '#') {
 92        switch (buf[1]) {
 93        case 'o':
 94          if (strncmp(buf, label[0], len = strlen(label[0])) == 0) {
 95            sscanf(buf + len, "%s", original_fname);
 96            ready |= 0x01;
 97          }
 98          break;
 99        case 'n':
100          if (strncmp(buf, label[1], len = strlen(label[1])) == 0) {
101            sscanf(buf + len, "%d", &num_channels);
102            ready |= 0x02;
103          }
104          else if (strncmp(buf, label[2], len = strlen(label[2])) == 0) {
105            sscanf(buf + len, "%d", &num_bits);
106            ready |= 0x04;
107          }
108          else if (strncmp(buf, label[3], len = strlen(label[3])) == 0) {
109            sscanf(buf + len, "%d", &num_samples);
110            ready |= 0x08;
111          }
112          else {
113            fprintf(stderr, "unknown: %s\n", buf);
114          }
115          break;
116        case 's':
117          if (strncmp(buf, label[4], len = strlen(label[4])) == 0) {
118            sscanf(buf + len, "%d", &sampling_rate);
119            ready |= 0x10;
120          }
121          break;
122        default:
123          ;
124          /* 何もしない */
125        }
126        if (ready == 0x1f) {
127          if (verbose) {
128            fprintf(stderr, "original file: %s\n", original_fname);
129            fprintf(stderr, "number of channels: %d\n", num_channels);
130            fprintf(stderr, "number of bits: %d\n", num_bits);
131            fprintf(stderr, "number of samples: %d\n", num_samples);
132            fprintf(stderr, "sampling rate: %d\n", sampling_rate);
133          }
134          break;
135        }
136      }
137      else {
138        /* パラメーターが揃わない (ready == 0x1f にならない) うちに
139         * 生データが来たらエラーだ */
140        printf("ready=%0x\n", ready);
141        fprintf(stderr, "%s\n", buf);
142        exit(1);
143      }
144    }
145
146    /* fmt チャンク */
147    fmt_size = 18; /* 2+2+4+4+2+2+2 */
148    fmt_tag = 1; /* 無圧縮 PCM */
149    bytes_per_seconds = sampling_rate * (num_bits / 8) * num_channels;
150    block = 1; /* ブロック境界 (何のこと？) */
```

```
151    extended_information_size = 0;
152    /* fact チャンクつけない */
153    /* data チャンク */
154    data_size = num_samples * (num_bits / 8) * num_channels;
155    /* */
156    riff_size = fmt_size + data_size;
157
158    /* ヘッダーを書く */
159    fprintf(out, "RIFF");
160    fwrite32(out, riff_size);
161    fprintf(out, "WAVE");
162    fprintf(out, "fmt ");
163    fwrite32(out, fmt_size);
164    fwrite16(out, fmt_tag);           /* 2bytes */
165    fwrite16(out, num_channels);      /* 2bytes */
166    fwrite32(out, sampling_rate);     /* 4bytes */
167    fwrite32(out, bytes_per_seconds); /* 4bytes */
168    fwrite16(out, block);             /* 2bytes */
169    fwrite16(out, num_bits);          /* 2bytes */
170    fwrite16(out, extended_information_size); /* 2bytes */
171    fprintf(out, "data");
172    fwrite32(out, data_size);
173
174    if (num_channels == 2 && num_bits == 16)
175      while (fgets(buf, sizeof(buf), in) != NULL) {
176        sscanf(buf, "%d%d", &left, &right);
177        fputc(left & 0xff, out); fputc((left >> 8) & 0xff, out);
178        fputc(right & 0xff, out); fputc((right >> 8) & 0xff, out);
179      }
180    else if (num_channels == 2 && num_bits == 8)
181      while (fgets(buf, sizeof(buf), in) != NULL) {
182        sscanf(buf, "%d%d", &left, &right);
183        fputc(left & 0xff, out);
184        fputc(right & 0xff, out);
185      }
186    else if (num_channels == 1 && num_bits == 16)
187      while (fgets(buf, sizeof(buf), in) != NULL) {
188        sscanf(buf, "%d", &c);
189        fputc(c & 0xff, out); fputc((c >> 8) & 0xff, out);
190      }
191    else if (num_channels == 1 && num_bits == 8)
192      while (fgets(buf, sizeof(buf), in) != NULL) {
193        sscanf(buf, "%d", &c);
194        fputc(c & 0xff, out);
195      }
196    fclose(out);
197    return 0;
198  }
```

5 Java でサウンドを扱う

5.1 参考にした情報

1. Sun が公式に出している情報 (ネットでクラスやメソッドの名前で検索すると出て来るもの)
2. http://forum.java.sun.com/thread.jspa?threadID=5205151\&tstart=75
3. 『Java で HelloWorld サウンド編』[6]

[6] http://www.hellohiro.com/sound.htm

2007 年度卒研が終ってから、本屋で赤間 [7] を見つけた (忙しいとのんびり本屋さんの棚を見る時間がないということで、とてもありがちなこと)。これは便利 (お勧め)。もっと早く見つけておけばと思ったけれど、まあ苦労したのは無駄にならないと考えることにしよう。

桂田研の学生の Java はぶっつけ本番。戸川 [8] くらいを与えて、プールに突き飛ばす感じです。

5.2 拙作 DumpWave.java — WAVE ファイルはこうやって読める

http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/program/sound/DumpWave.java

要点は

```
AudioInputStream ais = AudioSystem.getAudioInputStream(new File("sound.wav"));
byte [] data = new byte [ais.available()];
ais.read(data);
ais.close();
```

ということ。

(クラス・ライブラリィが使えるので、readwave.c のような低レベルのことはする必要がない。)

以上はデータを一気に読む場合だが、1 バイトずつ読んだり、適当なサイズずつ読んだりする read() メソッドもある (ネットで検索すると簡単に見つかる)。

```
 1  /*
 2   * DumpWave.java
 3   */
 4
 5  import java.io.IOException;
 6  import java.io.File;
 7  import javax.sound.sampled.*;
 8
 9  public class DumpWave {
10      public static void main(String [] args) {
11          try {
12              AudioInputStream ais =
13                  AudioSystem.getAudioInputStream(new File(args[0]));
14              // オーディオ入力ストリームからデータを読む (一気に読むバージョン)
15              byte [] data = new byte [ais.available()];
16              ais.read(data);
17              ais.close();
18              // ファイルのフォーマットを調べる
19              AudioFormat af = ais.getFormat();
20              System.out.println("#channels: "         + af.getChannels());
21              System.out.println("#isBigEndian: "      + af.isBigEndian());
22              System.out.println("#FrameSize: "        + af.getFrameSize());
23              System.out.println("#SampleSizeInBits: " + af.getSampleSizeInBits());
24              System.out.println("#SampleRate: "       + af.getSampleRate());
25              if (af.getEncoding() == AudioFormat.Encoding.PCM_SIGNED) {
26                  System.out.println("#符号付 PCM");
27              }
28              else if (af.getEncoding() == AudioFormat.Encoding.PCM_UNSIGNED) {
29                  System.out.println("#符号無 PCM");
30              }
31              System.out.println("#サイズ: " + data.length + "バイト, "
32                                 + data.length / af.getSampleRate() + "秒");
33              // ステレオ,16 ビット, 符号付 PCM, リトルエンディアンのみ
34              if (af.getChannels() == 2 &&
```

```
35                  af.getSampleSizeInBits() == 16 &&
36                  af.getEncoding() == AudioFormat.Encoding.PCM_SIGNED &&
37                  (!af.isBigEndian())) {
38                  short left, right;
39                  for (int i = 0; i < data.length; i += 4) {
40                      left  = (short)(data[i]   & 0xff | (data[i+1] << 8));
41                      right = (short)(data[i+2] & 0xff | (data[i+3] << 8));
42                      System.out.println("" + left + " " + right);
43                  }
44              }
45              else {
46                  System.out.println("#ステレオ,16 ビット, 符号付 PCM, リトルエンディアンのみ対
応");
47              }
48          } catch (Exception e) {
49              e.printStackTrace();
50              System.exit(1);
51          }
52      }
53  }
```

コンパイル&実行

```
mathpc% javac DumpWave.java
mathpc% java DumpWave piano.wav
#channels: 2
#isBigEndian: false
#FrameSize: 4
#SampleSizeInBits: 16
#SampleRate: 44100.0
#符号付 PCM
#サイズ: 1228068 バイト, 27.847347 秒
64 64
62 62
65 62
(後略)
```

5.3 拙作 PlayWave.java — WAVE ファイルを読んで音を再生

http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/program/sound/PlayWave.java

『Java で HelloWorld サウンド編』[7] にサンプル・プログラムがある。それを参考にして作ったプログラム。

```
1  /*
2   * PlayWave.java --- WAVE ファイルの音を再生する
3   */
4
5  import java.io.IOException;
6  import java.io.File;
7  import javax.sound.sampled.*;
8
9  public class PlayWave {
10     public static void main(String [] args) {
11         try {
```

[7] http://www.hellohiro.com/sound.htm

```
12              AudioInputStream ais =
13                  AudioSystem.getAudioInputStream(new File(args[0]));
14              // オーディオ入力ストリームからデータを読む
15              byte [] data = new byte [ais.available()];
16              ais.read(data);
17              ais.close();
18              // ファイルのフォーマットを調べる
19              AudioFormat af = ais.getFormat();
20              // 再生する
21              DataLine.Info info = new DataLine.Info(SourceDataLine.class, af);
22              SourceDataLine line = (SourceDataLine)AudioSystem.getLine(info);
23              line.open(af);
24              line.start();
25              line.write(data, 0, data.length);
26          } catch (Exception e) {
27              e.printStackTrace();
28              System.exit(1);
29          }
30      }
31  }
```

もしかして、line.drain(); と line.close(); も必要かな。

コンパイル&実行

```
knoppix$ javac PlayWave.java
knoppix$ java PlayWave piano.wav
```

なお、Clip として再生する方法もある。見比べると良い。

```
 1  /*
 2   * PlayWave_another.java --- Clip を使って再生する (参考)
 3  *   データの中身が見えないので卒研的にはあまり意味がないけれど…
 4   */
 5
 6  import java.io.*;
 7  import javax.sound.sampled.*;
 8
 9  public class PlayWave_another {
10      public static void main(String [] args) throws Exception {
11          AudioInputStream ais =
12              AudioSystem.getAudioInputStream(new File(args[0]));
13          Clip clip = (Clip)AudioSystem.getLine(new Line.Info(Clip.class));
14          try {
15              clip.open(ais);
16              clip.loop(0); // 0+1 回再生…それなら clip.start() でもよい
17              while (clip.isRunning()) {
18                  Thread.sleep(100);
19              }
20          }
21          finally {
22              clip.close();
23              System.exit(0); // 意外にも必要
24          }
25      }
26  }
```

5.4 マイクロホンで録音して WAVE ファイルを作成

『Java で HelloWorld サウンド編』[8] にサンプル・プログラムがある。

[8] http://www.hellohiro.com/sound.htm

5.5 拙作 ReadWave.java

(これは古くてバグ入りだが、卒研の記録として残しておく。既に紹介した『Java で HelloWorld サウンド編』を参考にしたのだが、卒研が終ってから、赤間 [7] という本を見つけて、それを見れば楽だったはず。)

http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/program/sound/ReadWave.java

ReadWave.java は、Wave ファイルを読み込んで、音を鳴らしながら、音声データを数値表示するプログラムである。オーディオ・データの形式は、Java のクラス・ライブラリィが調べてくれるので、自前で解析する手間は省けている (Cf: readwave.c)。

コンパイル&実行

```
knoppix$ javac ReadWave.java
knoppix$ java ReadWave piano.wav > piano.txt
```

チェック用に http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/2007/piano.wav と http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/2007/piano.txt を公開しておく。

ソース・プログラムは案外長いが、 (i) 16 ビット・ステレオ、(ii) 8 ビット・ステレオ、 (iii) 16 ビット・モノラル、(iv) 8 ビット・モノラル、と 4 つに場合分けしてあるからである (本当はこれにエンディアンの違いと、符号の有無の違いで、さらに場合分けする必要があるが、それは無視した— と書いたのだけど、これは誤解かも知れない (2013/10)。)。

```
 1 //
 2 // ReadWave.java
 3 //   2008/1/30 初めて作成
 4 //   2008/2/13 一木君にバグを指摘される。Byte は符号付きだった。
 5 //   2008/2/15 やはりビット演算だけで記述することにした。
 6 //
 7
 8 import java.io.File;
 9 import javax.sound.sampled.*;
10
11 public class ReadWave {
12   private static final int EXTERNAL_BUFFER_SIZE = 128000;
13   public static void main(String[] args) {
14     int frameSize;       //
15     int sampleSizeInBits; // 音声データの数値のビット数 (16 または 8)
16     int channels;        // チャンネルの数 (2 がステレオ, 1 がモノラル)
17     float sampleRate;    // サンプリングレート (1 秒間の...)
18     boolean isStereo;    // ステレオか
19     boolean isBigEndian; // ビッグエンディアンか (上位バイトが先か)
20     if (args.length == 0) System.exit(0);
21     try {
22       // File クラスのインスタンスを生成する
23       File soundFile = new File(args[0]);
24       // オーディオ入力ストリームを取得する
25       AudioInputStream audioInputStream = AudioSystem.getAudioInputStream(soundFile);
26       // オーディオフォーマットを取得する
27       AudioFormat audioFormat = audioInputStream.getFormat();
28
29       // データラインの情報オブジェクトを生成する
30       DataLine.Info info = new DataLine.Info(SourceDataLine.class,audioFormat);
31       // 指定されたデータライン情報に一致するラインを取得する
32       SourceDataLine line = (SourceDataLine) AudioSystem.getLine(info);
33       // 指定されたオーディオ形式でラインを開きます
34       line.open(audioFormat);
35       // ラインでのデータ入出力を可能にします
36       line.start();
37
```

```
38          // データの形式を読み取る
39          channels = audioFormat.getChannels();
40          isStereo = (channels == 2);
41          isBigEndian = audioFormat.isBigEndian();
42          frameSize = audioFormat.getFrameSize();
43          sampleSizeInBits = audioFormat.getSampleSizeInBits();
44          sampleRate = audioFormat.getSampleRate();
45          System.out.println("#original file: " + args[0]);
46          System.out.println("#number of channels: " + channels);
47          System.out.println("#sampling rate: " + sampleRate);
48          System.out.println("#number of bits per sample: " + sampleSizeInBits);
49          System.out.println("#FrameSize: " + frameSize);
50          System.out.println("#isBigEndian: " + isBigEndian);
51          if (audioFormat.getEncoding() == AudioFormat.Encoding.PCM_SIGNED) {
52              System.out.println("#PCM Signed");
53          }
54          else if (audioFormat.getEncoding() == AudioFormat.Encoding.PCM_UNSIGNED) {
55              System.out.println("#PCM Unsigned!!!");
56              System.exit(0);
57          }
58          else {
59              System.out.println("#NO PCM!!");
60              System.exit(0);
61          }
62
63          // 音声データを読み取り、鳴らして、数値を表示
64          int nBytesRead = 0;
65          byte[] abData = new byte[EXTERNAL_BUFFER_SIZE];
66          if (isStereo) {
67              if (sampleSizeInBits == 16) {
68                  // 16 ビットステレオ (フツー)
69                  while (nBytesRead != -1) {
70                      // オーディオストリームからデータを読み込みます
71                      nBytesRead = audioInputStream.read(abData, 0, abData.length);
72                      if (nBytesRead >= 0) {
73                          // オーディオデータをミキサーに書き込みます
74                          int nBytesWritten = line.write(abData, 0, nBytesRead);
75                          for (int i = 0; i < nBytesRead; i += 4) {
76                              short left, right;
77                              left  = (short)(abData[i]   & 0xff | (abData[i+1] << 8));
78                              right = (short)(abData[i+2] & 0xff | (abData[i+3] << 8));
79                              System.out.println("" + left + " " + right);
80                          }
81                      }
82                  }
83              }
84              else { // sampleSizeInBits == 8
85                  // 8 ビットステレオ (フツー)
86                  while (nBytesRead != -1) {
87                      // オーディオストリームからデータを読み込みます
88                      nBytesRead = audioInputStream.read(abData, 0, abData.length);
89                      if (nBytesRead >= 0) {
90                          // オーディオデータをミキサーに書き込みます
91                          int nBytesWritten = line.write(abData, 0, nBytesRead);
92                          for (int i = 0; i < nBytesRead; i += 2) {
93                              short left, right;
94                              left =  (short)(abData[i]   & 0xff);
95                              right = (short)(abData[i+1] & 0xff);
96                              System.out.println("" + left + " " + right);
97                          }
98                      }
99                  }
100             }
```

```
101         }
102         else {
103             // モノラル
104             if (sampleSizeInBits == 16) {
105                 // 16 ビットモノラル
106                 while (nBytesRead != -1) {
107                     // オーディオストリームからデータを読み込みます
108                     nBytesRead = audioInputStream.read(abData, 0, abData.length);
109                     if (nBytesRead >= 0) {
110                         // オーディオデータをミキサーに書き込みます
111                         int nBytesWritten = line.write(abData, 0, nBytesRead);
112                         for (int i = 0; i < nBytesRead; i += 2) {
113                             short c;
114                             c = (short)(abData[i] & 0xff | (abData[i+1] << 8));
115                             System.out.println("" + c);
116                         }
117                     }
118                 }
119             }
120             else { // sampleSizeInBits == 8
121                 // 8 ビットモノラル
122                 while (nBytesRead != -1) {
123                     // オーディオストリームからデータを読み込みます
124                     nBytesRead = audioInputStream.read(abData, 0, abData.length);
125                     if (nBytesRead >= 0) {
126                         // オーディオデータをミキサーに書き込みます
127                         int nBytesWritten = line.write(abData, 0, nBytesRead);
128                         for (int i = 0; i < nBytesRead; i++) {
129                             short c;
130                             c = (short)(abData[i] & 0xff);
131                             System.out.println("" + c);
132                         }
133                     }
134                 }
135             }
136         }
137         // ラインからキューに入っているデータを排出します
138         line.drain();
139         // ラインを閉じます
140         line.close();
141 
142         System.exit(0);
143       } catch (Exception e) {
144         e.printStackTrace();
145         System.exit(1);
146       }
147     }
148 }
```

5.6 拙作 MakeWaveFile.java — 数値データから Wave ファイルを作る

http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/program/sound/MakeWaveFile.java

```
1  /*
2   * MakeWaveFile.java
3   *   version 1 (2008/3/5) by mk
4   *   参考: http://okwave.jp/qa1942478.html
5  http://java.sun.com/j2se/1.5.0/ja/docs/ja/api/javax/sound/sampled/AudioSystem.html
6   */
7 
8  import java.io.IOException;
9  import java.io.File;
```

```
10  import java.io.InputStream;
11  import java.io.ByteArrayInputStream;
12  import javax.sound.sampled.*;
13
14  public class MakeWaveFile {
15      public static void main(String[] args) throws IOException {
16          // 音の PCM データ (44.1kHz, 量子化ビット数 16, ステレオ, 3 秒)
17          byte[] data = new byte[44100 * 2 * 2 * 3];
18          // 適当なデータ (良い子は自分が考えるデータに変えてみよう)
19          for (int i = 0; i < data.length; i++) {
20              data[i] = (byte) (((i & (1 << 6)) == 0) ? -18 : 18);
21          }
22          // オーディオフォーマットを決める (44.1kHz, 16bit, stereo)
23          AudioFormat audioFormat =
24              new AudioFormat(AudioFormat.Encoding.PCM_SIGNED,
25                              44100.0F, 16, 2, 4, 44100.0F, false);
26          // ByteArrayInputStream を AudioInputStream にする
27          InputStream in = new ByteArrayInputStream(data);
28          AudioInputStream ais = new AudioInputStream(in,
29                                                      audioFormat,
30                                                      44100 * 2 * 2);
31          // オーディオファイルの種類を指定
32          AudioFileFormat.Type targetType = AudioFileFormat.Type.WAVE;
33          // 出力ファイル名
34          File outputFile = new File("test.wav");
35          // えいっ、と書く
36          AudioSystem.write(ais, targetType, outputFile);
37      }
38  }
```

5.7 FFT

5.7.1 FFTPACK

FFTW とかにも興味があるのだけれど、Java からどう使うかイマイチ分からなかったので、まあまあ分かっているものを叩き台にすることにした。

「FFT についてのメモ — FFTPACK の利用に向けて —」[9]

5.7.2 大浦 FFT

C で書かれた汎用 FFT (高速 フーリエ/コサイン/サイン 変換) パッケージ by 大浦拓哉[10] は、比較的簡単に Java に書き直せる。

[9] http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/text/fft-lecture.pdf

[10] http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~ooura/fft-j.html

コンパイル&テスト

```
oyabun% tar xzf fft.tgz
oyabun% cd fft
oyabun% cd sample1
oyabun% make
oyabun% ./test4g
data length n=? (must be 2^m)
1024
cdft err= 5.55112e-16
rdft err= 4.44089e-16
ddct err= 7.77156e-16
ddst err= 6.66134e-16
dfct err= 4.44089e-16
dfst err= 7.77156e-16
 test4g_h, test8g, test8g_h, testsg, testsg_h についても同様
oyabun% cd ../sample2
oyabun% make
oyabun% ./pi_fft4g
  ... (略) ...
```

2007 年度卒研で一木君は `fft4g.c` を Java に書き換えて使用した。

5.7.3 jfftpack

Paul N. Swarztrauber の **FFTPACK**[11] は古くからあるライブラリィだが、Java への移植 **jfftpack** (by Baoshe Zhang `baoshe.zhang@uleth.ca`)[12] がある。

FFTPACK については、マニュアルの邦訳「FFTPACK」[13] を用意してある。

卒研では、サンプル・プログラム `testjfftpack-unix.tar.gz`[14], `testjfftpack-win.lzh`[15] を用意した。

```
knoppix$ tar xzf testjfftpack-unix.tar.gz
knoppix$ cd testjfftpack-unix
knoppix$ javac -cp jfftpack.jar testfft.java
knoppix$ java -cp jfftpack.jar:. testfft
```

```
 1 /*
 2  * testfft.java
 3  *   FFTPACK の Java 版 jfftpack (http://www.netlib.org/fftpack/ で入手可)
 4  *   http://www.math.meiji.ac.jp/~mk/labo/2007/jfftpack.jar に載せる
 5  *
 6  *   jfftpack.jar の位置を環境変数 CLASSPATH で指定する。
 7  *   (1) Windows では set CLASSPATH=%CLASSPATH%;どこか\jfftpack.jar
 8  *   (2) Linux では export CLASSPATH=$CLASSPATH:どこか/jfftpack.jar
 9  *
10  *   あるいは java コマンドの -classpath オプションを使う。
```

[11] http://www.netlib.org/fftpack/
[12] http://www.netlib.org/fftpack/jfftpack.tgz
[13] http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/text/fftpack-index.pdf
[14] http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/2007/testjfftpack-unix.tar.gz
[15] http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/2007/testjfftpack-win.lzh

```
11   *     java -classpath どこか/jfftpack.jar:. testfft
12   *
13   */
14
15  import ca.uol.aig.fftpack.*;
16
17  public class testfft {
18      public static void main(String args[]) {
19          int i,n;
20          double dx,x;
21          double [] a;
22          n = 1024;
23          a = new double [n];
24          RealDoubleFFT myfft = new RealDoubleFFT(n);
25          // n 等分点上の関数値を求める
26          dx = 2 * Math.PI / n;
27          for (i = 0; i < n; i++) {
28              x = i * dx;
29              a[i] = 1+2*Math.cos(x)+3*Math.sin(x)+4*Math.cos(2*x);
30          }
31          // 離散 Fourier 変換
32          myfft.ft(a);
33          // Fourier 係数を求める
34          a[0] /= n;
35          for (i = 1; i < n; i++)
36              a[i] = a[i] / (n / 2.0);
37          // 1,2,3,4 が現われますやら…
38          for (i = 0; i < 10; i++)
39              System.out.printf("i=%d: %f\n", i, Math.abs(a[i]));
40          //          System.out.println("i=" + i + ":" + Math.abs(a[i]));
41      }
42  }
```

```
[chronos:sound/sound/jfftpack] mk% java testfft
i=0: 1.000000
i=1: 2.000000
i=2: 3.000000
i=3: 4.000000
i=4: 0.000000
i=5: 0.000000
i=6: 0.000000
i=7: 0.000000
i=8: 0.000000
i=9: 0.000000
[chronos:sound/sound/jfftpack] mk%
```

無事に 1, 2, 3, 4, 0, ... となりました。

防備録: jfftpack.jar の作り方　ca.uol.aig.fftpack という package 名であることに注意。

```
mkdir -p ca/uol/aig/fftpack          (ディレクトリィを用意)
cp -p どこか/*.java ca/uol/aig/fftpack   (ソース・プログラムを用意)
javac ca/uol/aig/fftpack/*.java      (ソース・プログラムをコンパイル)
jar -cvf /fftpack.jar .              (jar ファイルを作る)
jar -tvf /fftpack.jar                (jar ファイルの中身を確認する)
```

6 MATLAB

(準備中)

さすがに便利そうなのだけれど、最近は Mathematica で色々やっているので、こちらで何かするのは、いつになるか分からない。さすがに Octave では、`sound()` は undefined になる…

ネットで検索すると、`http://lis2.huie.hokudai.ac.jp/~toyo/MATLAB/` という便利なページがある。

今所属しているところでは、MATLAB の Toolbox がふんだんに使えるので、そういうのを利用するときっとすごく便利なのでしょう (チャレンジャー募集)…

6.1 sound() で音を鳴らす

`sound()` は Mathematica の `ListPlay[]` に相当する。

```
samplerate=44100;
Tmax=1;
freq=440;
t=0:1/samplerate:Tmax;
sampledata=sin(2*pi*freq*t);
sound(sampledata,samplerate);
```

6.2 wavrecord() で録音

```
samplerate=44100;
Tmax=10;
sampledata=wavrecord(Tmax*samplerate,samplerate);

wavwrite(sampledata,samplerate,'sample.wav');
```

6.3 wavread() で WAVE ファイルを読む

```
sampledata=wavread('sample.wav');

[sampledata,samplerate,bits]=wavread('sample.wav');
```

`wavread('sample.wav', numtoread);` や `wavread('sample.wav', [from to]);` などのようなことが出来る。

6.4 wavwrite()

```
wavwrite(sampledata,'file.wav');
wavwrite(sampledata,samplerate,'file.wav');
wavwrite(sampledata,samplerate,N,'file.wav');  N=8,16,24,32
```

7 Python

Python では色々なやり方があるらしい。

7.1 WAVE ファイルのパラメーターを読み取る

wave モジュールというのがあるけれど、scipy でも WAVE ファイル読めるみたいだし。以下のサンプル・プログラムでは wave モジュールを使っている。

readparam.py

```
#coding: utf-8
# readparam.py --- WAVE ファイルのパラメーター調査

import wave
import sys

argv = sys.argv
argc = len(argv)

if argc == 1:
    fname = "guitar-5-3.wav"
else:
    fname = argv[1]

wavefile = wave.open(fname)
nchannels = wavefile.getnchannels() # 1: モノラル, 2: ステレオ
samplewidth = wavefile.getsampwidth()
samplingrate = wavefile.getframerate()
numframes = wavefile.getnframes()
parameters = wavefile.getparams()

print "ファイル名: ", fname
print "チャンネル数: ",nchannels
print "サンプル幅: ", samplewidth
print "サンプリング周波数: ", samplingrate
print "フレームの総数: ", numframes
print "パラメーター: ",parameters
```

7.2 pyaudio で WAVE ファイルを再生する

どれを選ぶべきか分からないけれど、ネットで pyaudio を推している人がいて、それに従ってみる。

readparam.py

```
#coding: utf-8
# 参考 http://aidiary.hatenablog.com/entry/20110515/1305420830
# 準備 sudo port install py27-pyaudio

import wave
import pyaudio
import sys # argv

if __name__ == '__main__':
    argv = sys.argv
    argc = len(argv)
    if argc == 1:
        wf = wave.open("guitar-5-3.wav", "r")
    else:
        wf = wave.open(argv[1], "r")

    # ストリームを開く
    p = pyaudio.PyAudio()
    stream = p.open(format=p.get_format_from_width(wf.getsampwidth()),
                    channels=wf.getnchannels(),
                    rate=wf.getframerate(),
                    output=True)

    # チャンク単位でストリームに出力し音声を再生
    chunk = 1024
    data = wf.readframes(chunk)
    while data != '':
        stream.write(data)
        data = wf.readframes(chunk)
    stream.close()
    p.terminate()
```

7.3 DFT してスペクトルを調べる

FFT はより取り見取り。
“FFT scipy vs numpy” で検索したら

> python - What is the difference between numpy.fft and scipy.fftpack
> https://stackoverflow.com/questions/6363154/what-is-the-difference-between-numpy-f

とか出て来た。scipy と numpy だと、scipy がずっと速いという人がいたり (僕には「ちょっと」としか思えなかった)、多次元だと numpy の方が速いとか、FFTW を使う方が速いとか。

スピード競争は好きな人に任せる。某授業で Mathematica でやったことをほぼそのまま後追いしてみる。

sound1.py

```
# sound1.py
# coding:utf-8
# 原始的なやり方で WAVE ファイルを扱う

# https://docs.python.jp/3/library/wave.html
# http://aidiary.hatenablog.com/entry/20110618/1308367728

# sudo port install py27-scipy
# sudo port install py27-matplotlib これに +gtk2 つける？
#   ~/.matplotlib/matplotlibrc に何か書く。例えば
#   backend : TkAgg
# sudo port install py27-pygtk

# import モジュール名 とすると、モジュール名のみがシンボルテーブルに入る
#   モジュール名.関数名 でアクセス
#   好きな名前 = モジュール名.関数名 という小技もある
#
# from モジュール名 import * はモジュールで定義されている名前をすべて入れる
#

import wave
import numpy as np
import scipy.fftpack # サブパッケージは一々 import する
import matplotlib
#matplotlib.use('GTKAgg')# GTK GTKAgg tkagg とかあるけど、GTKAgg しか動かん
import matplotlib.pyplot as plt #

# WAVE ファイルをオープンする
wf = wave.open("guitar-5-3.wav", "r")

# サンプリング・レートを得る (Python 的には frame rate という)
sr = wf.getframerate()

# チャンネル数を得る (モノラルか
nchannels = wf.getnchannels()

# サンプルあたりのバイト数
samplewidth = wf.getsampwidth()

# フレームの総数
nframes = wf.getnframes()

# すべてのフレームを読み込む
snd = wf.readframes(nframes) # snd=wf.readframes(wf.getnframes()) とも出来る

# もう閉じていいでしょう
wf.close()

#
if samplewidth == 2:
    tbl=np.frombuffer(snd, dtype="int16")/32768.0
elif samplewidth == 4:
    tbl=np.frombuffer(snd, dtype="int32")/2147483648.0

# ステレオの場合は左チャンネルだけ
if nchannels == 2:
    tbl = tbl[::2]  # tbl=tbl[1::2] とすると右チャンネル
elif nchannerls == 1:
    print(u"モノラル")
else:
    print(u"あれ？チャンネル数=", nchannels)

# とりあえず先頭から 3 秒分プロットしてみる
plt.plot(tbl[:3*sr])
plt.show()
```



```
# 62800 番目から 1 秒分取り出してプロットする (そうすると周波数簡単)
```

7.4 WAVE ファイルを作る

A, f を正の定数とするとき、時刻 t (秒) での値が

$$u(t) = A\sin(2\pi f t)$$

である信号は、振幅 A, 周波数 f (Hz) の正弦波である。

次のプログラムを実行すると、$f = 440$ Hz の信号を 10 秒間記録した WAVE ファイル (サンプリング周波数 44100 Hz モノラル、量子化ビット数 16 ビット、モノラル) "sinwave.wav" が出来る。

http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/fourier/testwritewave.py

```
 1  # testwritewave.py
 2  # encoding: utf-8
 3  # http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/lecture/fourier-2017/testwavemodule3.py
 4  # これは Python 3.x 用のプログラム
 5
 6  import numpy as np
 7  import wave
 8  import struct
 9
10  fname = 'sinwave.wav'
11  wf = wave.open(fname, 'w')
12  ch = 1
13  width = 2
14  samplerate = 44100
15  wf.setnchannels(ch)
16  wf.setsampwidth(width)
17  wf.setframerate(samplerate)
18
19  time = 10
20  numsamples = time * samplerate
21
22  # python 2.x では ( ) を取る
23  print( u"チャンネル数 = ", ch)
24  print( u"サンプル幅 (バイト数) = ", width)
25  print( u"サンプリングレート (Hz) =", samplerate)
26  print( u"サンプル数 =", numsamples)
27  print( u"録音時間 =", time)
28
29  # 信号データを作る (numpy の ndarray で)
30  freq = 440                              # 周波数 freq を 440 Hz にする
31  x=np.linspace(0, time, numsamples+1) # 0 ≦ t ≦ time を numsamples 等分
32  y=np.sin(2 * np.pi * freq * x)       # 周波数 freq (Hz) の正弦波
33  y=np.rint(32767*y/max(abs(y)))       # [-32767,32767] の範囲に収める
34  y=y.astype(np.int16)                 # 16 ビット整数に型変換する
35  y=y[0:numsamples]                    # numsamples 個のデータに打ち切る
36
37  # ndarray から bytes オブジェクトに変換
38  data=struct.pack("h" * numsamples , *y)
39
40  # データを書き出す
41  wf.writeframes(data)
42  wf.close()
```

A　Mac の相場

A.1　QuickTime Player での録音

QuickTime Player で一応録音は出来る。QuickTime Player は Finder でアプリケーション・フォルダーを探すと見つかる。[ファイル] メニューから新規オーディオ収録を選択し、右側にあるボタンで録音品質を選択する。

品質は「高」、「最高」の二つから選択できる (何だそれは)。

- 「最高」にすると拡張子が `.aifc` の AIFC というフォーマットになる。
- 「高」にすると拡張子が `.m4a` というフォーマットになる。

AIFC は、AIFF (Audio Interchange File Format) という 1990 年頃に Apple が決めたフォーマットをもとに、圧縮を取り入れたものである。

AIFF そのものは Linear PCM であり、圧縮はしていない。

「最高」で録音すると、拡張子は `.aifc` であるが、どうも 24 ビット Linear PCM, ステレオ、サンプリング周波数 44.1kHz であるようだ (以下のやり方で 24 ビット WAVE に変換するとファイルのサイズが同じになる— いい加減な根拠だ…まあ、そのうち調べよう)。ちなみに Mathematica 9 で `Import[]` で読もうとしても駄目だった (けっこう `Import[]` へたれです)。

`afconvert` という Apple 純正のコマンドライン・ツールでフォーマット変換が出来る。例えばターミナルで次のようにして「普通の」WAVE ファイルに変換できる。

nantoka.aifc を WAVE 形式のファイル nantoka.wav に変換

```
afconvert -f WAVE -d LEI16 nantoka.aifc nantoka.wav
```

(-d はデータのフォーマットの指定で、(a) エンディアン, (b) 値のタイプ (U or LEI or LEF), (c) ビット数という 3 つの項目を表す文字列で Linear PCM の形式を表す、ということらしい。例えば LEI16 は、リトルエンディアンの符号あり整数 16 ビットという意味である。ここで他に指定できるフォーマットは、UI8 (符号なし整数 8 ビット), LEI24 (リトルエンディアン符号あり整数 24 ビット), LEI32 (リトルエンディアン符号あり整数 32 ビット), LEF32 (リトルエンディアン符号あり浮動小数 32 ビット), LEF64 (リトルエンディアン符号あり浮動小数 64 ビット) だとか。)

LEI16 の後に@数値をくっつけて、サンプリング周波数の指定もできるみたい。-d LEI16@22050 (22050Hz)

Mathematica 9 では、LEI16 はもちろんだが、LEI24 も読むことが出来た。

その他、afconvert で扱えるフォーマットにどういうのがあるかは、afconvert -hf で表示される短いヘルプメッセージを見ると良い (というか、長い説明は用意されていない)。

-c 1 とするとモノラルに出来る (チャンネル数を 1 にする)。

B iPhone での録音

(工事中, 。)

標準のアプリである**ボイスメモ**で録音出来る。

iPhone の外への転送の仕方は、iTunes を使う方法、AirDrop を使う方法、メールに添付する方法などがあるそうだ (こういうのは学生の方が詳しそうだ)。

拡張子が .m4a のファイルが出来るが、ffmpeg[16] で WAVE ファイルに変換できる。例えば、piano.m4a を WAVE ファイル piano.wav に変換するには、ターミナルで

```
ffmpeg -i piano.m4a piano.wav
```

とすれば良い。

C 調べないと

C.1 音高 (ピッチ) を調べる

難波編 [9] 第 7 章に

1. 位相差計測法
2. 複素スペクトル内挿法

というのが紹介されている。記述が簡単すぎて良く分からないが、原典 (井口 [10], 原・井口 [11]) にあたって勉強してみよう。

[16] フリーソフトで、現象数理学科 Mac にはインストール済みのはず。

C.2 インハーモニシティ

太田 [12] 土橋 [13]

- Wikipedia の Inharmonicity
- Isoharu Nishiguchi, Recent research on the acoustics of pianos, http://www.jstage.jst.go.jp/article/ast/25/6/413/_pdf
- Neville H. Fletcher, Harmonic? Anharmonic? Inharmonic?, Am. J. Phys. 70 12!, December 2002, http://www.phys.unsw.edu.au/music/people/publications/Fletcher2002.pdf
- Numerical simulations of piano strings. I. A physical model for a struck string using finite difference methods, http://people.cs.uchicago.edu/~ridg/stabil/pianostring.pdf
- http://piano.s20.xrea.com/mecha/doc03.html
- 川口和也, 中井幹雄, 打弦時に発生するインハーモニシティに関する研究, 日本機会学会 Dynamics and Design Conference 2001, http://www.jsme.or.jp/monograph/dmc/2001/data/pdf/729.pdf
  これと同じか?Dynamics & Design Conference. アブストラクト集, Vol.2003, No.abstract(20030915) p. 218, The Japan Society of Mechanical Engineers ISSN:13480235
- Dynamics & Design Conference. アブストラクト集 Vol.2003, No.abstract(20030915) p. 218 The Japan Society of Mechanical Engineers ISSN:13480235
- Dynamics & Design Conference. アブストラクト集 Vol.2003, No.abstract(20030915) p. 218 The Japan Society of Mechanical Engineers ISSN:13480235
- ROBERT W. YOUNG, Inharmonicity of Plain Wire Piano Strings, The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 24, Number 3, MAY 1952, http://www.afn.org/~afn49304/youngnew.htm
- 『もっと知りたいピアノのしくみ』(西口磯春、森太郎　著／音楽之友社)

D 個人的記憶

D.1 レコード

D.2 テープレコーダー

D.3 CD プレーヤー

D.4 ベネット『パソコンプログラム 理科系のための問題演習』

ベネット [14]

参考文献

[1] 横山和正：常微分作用素の固有値問題の数値解析, http:///nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/report/open/2003-yokoyama.pdf (2004).

[2] 桂田祐史：卒業研究テーマ 固有値問題とそのシミュレーション, http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/2003/eigenvalue/ (2003 年 11 月 11 日).

[3] N. H. フレッチャー, T. D. ロッシング：楽器の物理学, シュプリンガー・フェアラーク東京 (2002), 岸 憲史, 久保田 秀美, 吉川 茂 訳.

[4] 城都健一：ディジタルフーリエ解析 (I) —基礎編—, コロナ社 (2007).

[5] 城都健一：ディジタルフーリエ解析 (II) —上級編—, コロナ社 (2007).

[6] 松山周五郎：音の Fourier 解析, 2003 年度卒業研究レポート, http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/report/open/2003-matsuyama.pdf (2004).

[7] 赤間世紀（あかませいき）：JavaSound 教科書, 工学社 (2007).

[8] 戸川隼人（はやと）：演習と応用 Java, サイエンス社 (2004).

[9] 難波 精一郎編：音の科学, 朝倉書店 (1989).

[10] 井口征士：音楽情報の処理 — 電算機を用いた自動採譜, 計測と制御, Vol. 19, pp. 314–319 (1980).

[11] 原裕一郎, 井口征士：複素スペクトルを用いた周波数同定, 第 19 巻 (1983).

[12] 太田高正：ピアノ弦の性質と調律曲線, 数学セミナー, 2007 年 12 月号, pp. 37–41 (2007).

[13] 土橋光義：Sound and Temperament Lab ピアノの音と音律：http://park11.wakwak.com/~md440/.

[14] W. R. ベネット：パソコンプログラム 理科系のための問題演習, 現代数学社 (1983), William Ralph Bennett, Scientific and Engineering Problem-solving with the Computer, Prentice Hall (1976) の邦訳。 学生の頃、邦訳の方が愛読書でした (どこかに行ってしまった…)。 今古本で買うと高いので、原著の方を買ってみました (ハードカバーでなかなか立派な本です)。