2007 年度 卒業研究レポート

# Java による音の Fourier 解析

明治大学 理工学部 数学科
一木裕貴

2008 年 3 月 5 日

# 目 次

# 第1章　はじめに

## 1.1　目標

波動方程式

$$\frac{1}{c^2}u_{tt} = u_{xx} \qquad (t > 0, x \in (0,1))$$

と初期条件

$$u(x,0) = \phi(x) \qquad (x \in [0,1]),$$
$$u_t(x,0) = \psi(x) \qquad (x \in [0,1])$$

それといずれかの境界条件

(Dirichlet 境界条件)　$u(0,t) = u(1,t) = 0 \qquad (t > 0)$

(Neumann 境界条件)　$u_x(0,t) = u_x(1,t) = 0 \qquad (t > 0)$

を課した初期値境界値問題の解の音を聴くことを最初の目標としましたが、これは出来ていません。

今回行ったのは実際の楽器の音を FFT で分析することです。

# 第2章　実際の音に対するDFT

## 2.1　Fourier級数

離散 Fourier 変換を説明する為の準備として Fourier 級数の復習をする。
適度に滑らかな周期 $T$ の関数 $u : \mathbb{R} \to \mathbb{C}$ は次のようにフーリエ級数展開できる。

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp\left(\frac{2\pi i n t}{T}\right), \qquad i = \sqrt{-1}$$

ただし、$c_n$ は次式で定められるフーリエ係数とする。

$$c_n = \frac{1}{T}\int_0^T u(t) \exp\left(-\frac{2\pi i n t}{T}\right) dt.$$

## 2.2　離散 Fourier 変換

$u$ が周期 $T$ の関数であるとする。$N \in \mathbb{N}$ を固定して

$$\omega = \omega_N := \exp\left(\frac{2\pi i}{N}\right)$$

とおく。$\omega$ は 1 の原始 $N$ 乗根である。さらに $j \in \mathbb{Z}$ に対して

$$t_j := j\frac{T}{N}, \qquad u_j := u(t_j)$$

とおく。$u_j$ は周期 $N$ の周期数列である。フーリエ係数 $c_n$ の定義式の定積分を台形公式で近似したものを離散フーリエ係数 $C_n$ とおくと、

$$C_n = \frac{1}{T}\sum_{j=0}^{N-1} u(t_j) \exp\left(\frac{-2\pi i n}{T} t_j\right) \frac{T}{N} = \frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N-1} \omega^{-jn} u_j$$

が成り立つ。$C_n$ も $n$ について周期 $N$ の数列である。$\{u_j\} \mapsto \{C_n\}$ に変換することを離散 Fourier 変換（Discrete Fourier Transform,DFT）と言う。
逆に

$$u_n = \sum_{j=0}^{N-1} C_n \omega^{jn}$$

と言う式も成り立つ。$\{C_n\} \mapsto \{u_j\}$ に変換することを逆離散 Fourier 変換と言う。

台形公式とは

$$\int_0^T U(t)dt \fallingdotseq \left(\frac{1}{2}U(0) + \sum_{j=1}^{N-1} U(t_j) + \frac{1}{2}U(T)\right)\frac{T}{N}$$

と近似するものである。これは小区間 $[t_j, t_{j+1}]$ で次の近似をしたものである。

$$\int_{t_j}^{t_{j+1}} U(t)dt \fallingdotseq \frac{1}{2}\left(U(t_j) + U(t_{j+1})\right)\frac{T}{N}$$

周期関数では $U(0) = U(T)$ なので、台形公式は

$$\int_0^T U(t)dt \fallingdotseq \sum_{j=0}^{N-1} U(t_j)\frac{T}{N}$$

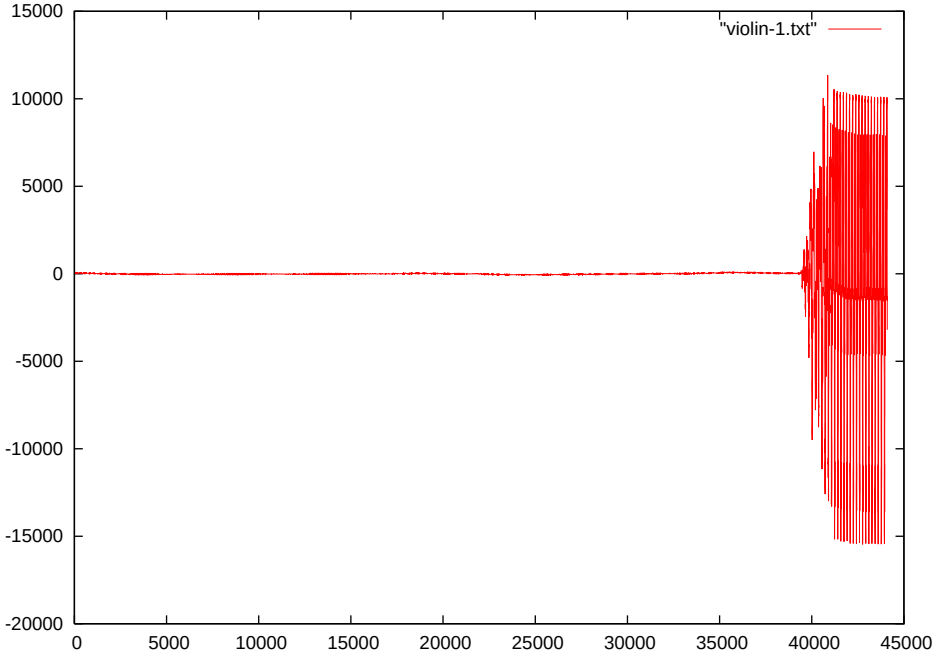
となる。周期関数の 1 周期の積分は台形公式で非常に高精度に求まることが知られている。

## 2.3 ヴァイオリンの音の波形

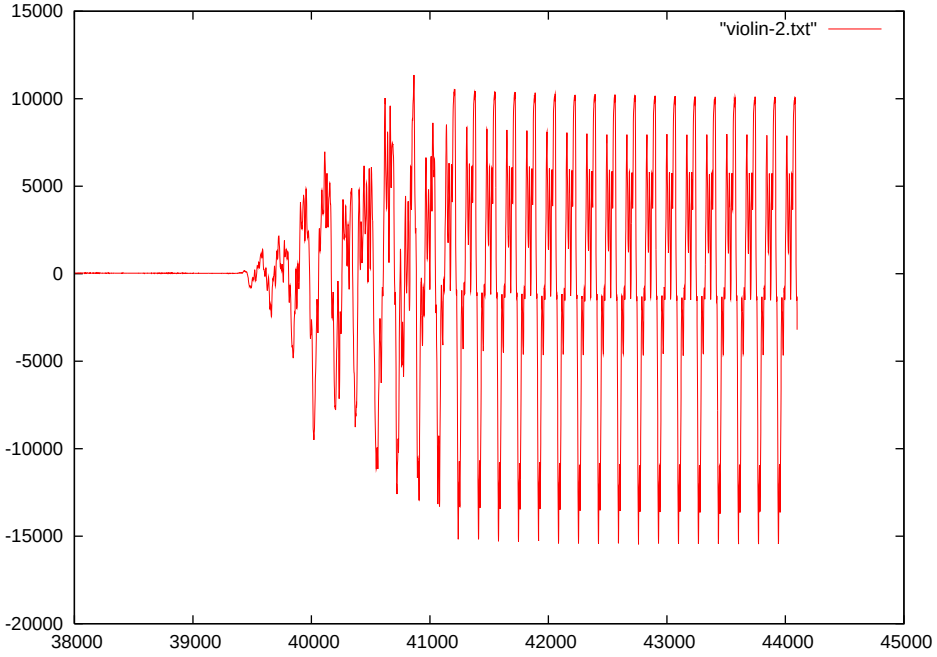
Windows のサウンドレコーダーを使用し録音したデータ、サンプリング周波数 44.1kHz・量子化ビット数 16 ビット・ステレオのヴァイオリンのドの音を使う。

サンプリング周波数＝1 秒間に何回データを記録するか。
この場合は 1 秒間に 44100 個のデータが入っている。
量子化ビット数＝測定に使用する目盛りの細かさ。
この場合は $-2^{15}$〜$2^{15}-1$ の 65536 段階で表現されている。

最初の 1 秒間の波形を表示する。



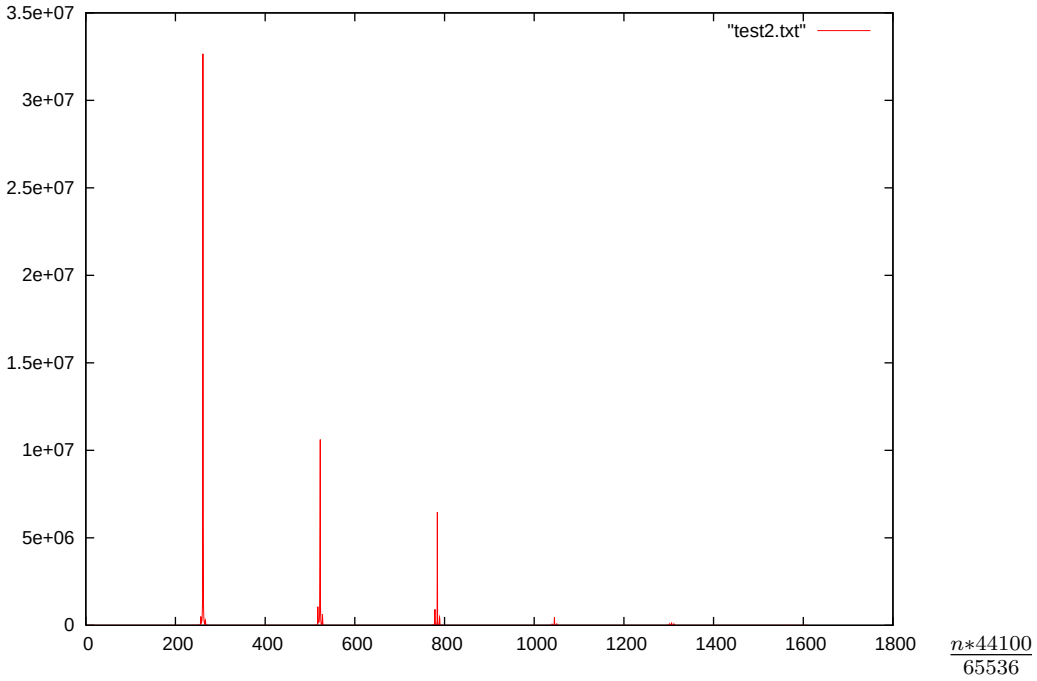
この図を見れば最初の方は振幅が小さいことが分かる。これは録音し始めて実際に弾くまでの間だと思われる。よってその部分を削除してみる。




すると振幅が 39500 番目ぐらいから大きくなっているのが分かる。ゆえに、39500〜のデータを使って DFT することにする。

## 2.4 ヴァイオリンの音に対する DFT

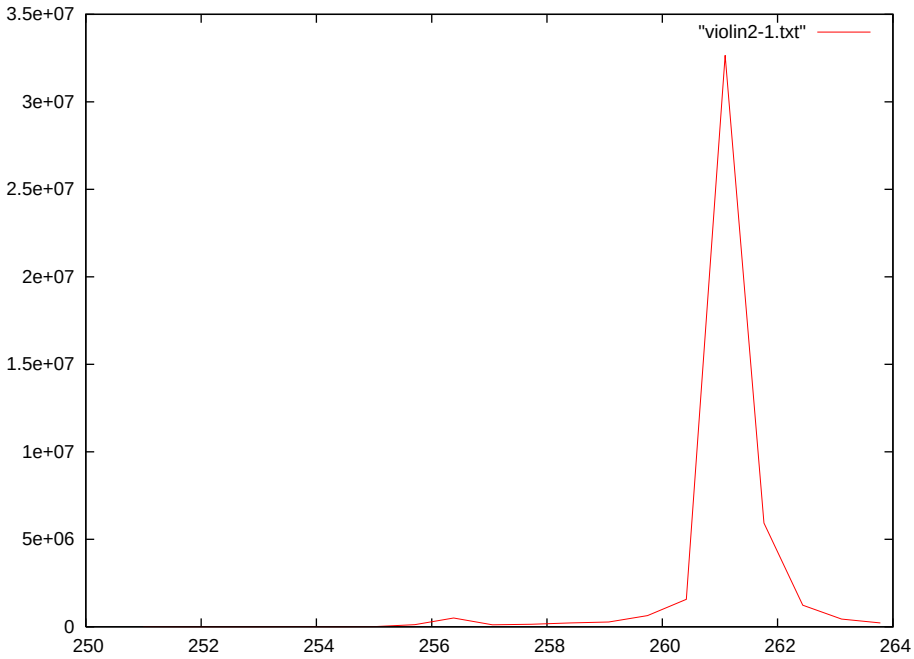
プログラムの都合上[1]、音が鳴り始めてから 65536 個のデータ ($T = \dfrac{65536}{44100}$ 秒分のデータ) を DFT し、2400 個分の $|C_n|^2$ をグラフ化したものが次の図である。




[1]大浦 FFT では、データの個数が 2 のべき乗でないといけない。

$C_1$ は $f_1 = 1/T = \dfrac{44100}{65536}$ Hz に対応している。$|C_n|$ は、$n = 388$ のときに最大となっているが、対応する周波数は、$388 f_1 = 388 \cdot \dfrac{44100}{65536} = 261.090\cdots$ Hz である。グラフの横軸には、直接周波数を読み取れるように $\dfrac{n * 44100}{65536}$ の値を表示してある。

この図のピークのあたりを拡大してみる。




はっきり約 261 Hz でピークを迎えていることが分かる。これはドの音の周波数（261Hz）に相当する。よって、DFT すれば音が分からなくても高さが読み取れる。

# 第3章　大浦FFTの書き換え

## 3.1　はじめに

今回音の分析をするにあたって、Ooura's Mathematical Software Packages (大浦 [1]) にある「汎用 FFT (高速 フーリエ/コサイン/サイン 変換) パッケージ」を使用しています。これはCで書かれているのでJavaに変換しています。

ここではその際の書き換えの手順を追っていきます。

## 3.2　C→Javaへの移植

まずは大まかにJavaへ変換していきます。CとJavaはかなり同じに書けるのでこの作業は楽です。ここからは例を挙げながら説明していきます。

```
1   void makewt(int nw, int *ip, double *w)
2   {
3       void bitrv2(int n, int *ip, double *a);
4       int j, nwh;
5       double delta, x, y;
6
7       ip[0] = nw;
8       ip[1] = 1;
9       if (nw > 2) {
10          nwh = nw >> 1;
11          delta = atan(1.0) / nwh;
12          w[0] = 1;
13          w[1] = 0;
14          w[nwh] = cos(delta * nwh);
15          w[nwh + 1] = w[nwh];
16          if (nwh > 2) {
17              for (j = 2; j < nwh; j += 2) {
18                  x = cos(delta * j);
19                  y = sin(delta * j);
20                  w[j] = x;
21                  w[j + 1] = y;
22                  w[nw - j] = y;
23                  w[nw - j + 1] = x;
24              }
25              bitrv2(nw, ip + 2, w);
26          }
27      }
28  }
```

これは元のプログラムの一部です、修正が必要な行は1・3・11・14・18・19・25行目になります。

```
1   private static void makewt(int nw, int [] ip, double [] w)
2   {
3       int j, nwh;
4       double delta, x, y;
5
6       ip[0] = nw;
7       ip[1] = 1;
8       if (nw > 2) {
9           nwh = nw >> 1;
10          delta = Math.atan(1.0) / nwh;
11          w[0] = 1;
12          w[1] = 0;
13          w[nwh] = Math.cos(delta * nwh);
14          w[nwh + 1] = w[nwh];
15          if (nwh > 2) {
16              for (j = 2; j < nwh; j += 2) {
17                  x = Math.cos(delta * j);
18                  y = Math.sin(delta * j);
19                  w[j] = x;
20                  w[j + 1] = y;
21                  w[nw - j] = y;
22                  w[nw - j + 1] = x;
23              }
24              bitrv2a(nw, ip, w);
25          }
26      }
27  }
```

と、このような形に書き直します。

よく見るとJava24行目の部分がかなり変わっていることに気づくと思います。元はip+2となっていて、これは配列の番号をずらすと言う作業なのですが、Javaでは使えません。よって、新しく関数を定義する必要があります。

元のbitrv2と言うのは

```
1   void bitrv2(int n, int *ip, double *a)
2   {
3       int j, j1, k, k1, l, m, m2;
4       double xr, xi, yr, yi;
5
6       ip[0] = 0;
7       l = n;
8       m = 1;
9       while ((m << 3) < l) {
10          l >>= 1;
11          for (j = 0; j < m; j++) {
12              ip[m + j] = ip[j] + l;
13          }
14          m <<= 1;
15      }
16      m2 = 2 * m;
17      if ((m << 3) == l) {
18          for (k = 0; k < m; k++) {
19              for (j = 0; j < k; j++) {
20                  j1 = 2 * j + ip[k];
21                  k1 = 2 * k + ip[j];
22                  xr = a[j1];
```

```
23                  xi = a[j1 + 1];
24                  yr = a[k1];
25                  yi = a[k1 + 1];
26                  中略
```

と言うものです。ip 以外の部分は同じなので、元の bitrv2 をコピーして使います。その際名前を変えないといけないのでここでは bitrv2a とします。ip の部分に 2 を加えると言う作業を 6・12・20・21 行目に行います。

```
1   private static void bitrv2a(int n, int [] ip, double [] a)
2   {
3       int j, j1, k, k1, l, m, m2;
4       double xr, xi, yr, yi;
5
6       ip[2] = 0;
7       l = n;
8       m = 1;
9       while ((m << 3) < l) {
10          l >>= 1;
11          for (j = 0; j < m; j++) {
12              ip[m + j + 2] = ip[j + 2] + l;
13          }
14          m <<= 1;
15      }
16      m2 = 2 * m;
17      if ((m << 3) == l) {
18          for (k = 0; k < m; k++) {
19              for (j = 0; j < k; j++) {
20                  j1 = 2 * j + ip[k + 2];
21                  k1 = 2 * k + ip[j + 2];
22                  xr = a[j1];
23                  xi = a[j1 + 1];
24                  yr = a[k1];
25                  yi = a[k1 + 1];
26                  中略
```

この様に新しく関数を定義すれば問題なく動きます。
しかし、+の部分を修正していくと問題に当たります。

```
1   void rdft(int n, int isgn, double *a, int *ip, double *w)
2   {
3       void makewt(int nw, int *ip, double *w);
4       void makect(int nc, int *ip, double *c);
5       void bitrv2(int n, int *ip, double *a);
6       void cftfsub(int n, double *a, double *w);
7       void cftbsub(int n, double *a, double *w);
8       void rftfsub(int n, double *a, int nc, double *c);
9       void rftbsub(int n, double *a, int nc, double *c);
10      int nw, nc;
11      double xi;
12
13      nw = ip[0];
14      if (n > (nw << 2)) {
15          nw = n >> 2;
16          makewt(nw, ip, w);
17      }
```

```
18      nc = ip[1];
19      if (n > (nc << 2)) {
20          nc = n >> 2;
21          makect(nc, ip, w + nw);
22      }
23      中略
```

21 行目です。+の値が数値じゃないので今までのようにやるとエラーが起こります。そこで今回は少し変えて修正します。

元の makect は

```
1   void makect(int nc, int *ip, double *c)
2   {
3       int j, nch;
4       double delta;
5
6       ip[1] = nc;
7       if (nc > 1) {
8           nch = nc >> 1;
9           delta = atan(1.0) / nch;
10          c[0] = cos(delta * nch);
11          c[nch] = 0.5 * c[0];
12          for (j = 1; j < nch; j++) {
13              c[j] = 0.5 * cos(delta * j);
14              c[nc - j] = 0.5 * sin(delta * j);
15          }
16      }
17  }
```

w の部分に nw を加えると言う操作を行うのですが、元のプログラムには w がありません。この場合は c が w に対応しているので c に nw を加えることになります。

```
1   private static void makect2(int nc, int [] ip, double [] c, int nw)
2   {
3       int j, nch;
4       double delta;
5
6       ip[1] = nc;
7       if (nc > 1) {
8           nch = nc >> 1;
9           delta = Math.atan(1.0) / nch;
10          c[nw] = Math.cos(delta * nch);
11          c[nch + nw] = 0.5 * c[nw];
12          for (j = 1; j < nch; j++) {
13              c[j + nw] = 0.5 * Math.cos(delta * j);
14              c[nc - j + nw] = 0.5 * Math.sin(delta * j);
15          }
16      }
17  }
```

ここでいつもと違うのが 1 行目、ひとつ定義が増えています。+の部分の数値を読むようにしてあります。こうする事によりエラーがなくなります。

実際に使うときも

```
1  private static void rdft(int n, int isgn, double [] a, int [] ip, double [] w)
2  {
3      int nw, nc;
4      double xi;
5
6      nw = ip[0];
7      if (n > (nw << 2)) {
8          nw = n >> 2;
9          makewt(nw, ip, w);
10     }
11     nc = ip[1];
12     if (n > (nc << 2)) {
13         nc = n >> 2;
14         makect2(nc, ip, w, nw);
15     }
16     中略
```

14 行目のように+の値の部分を一箇所増やして使います。
この様な作業を全てに行っていけば Java への書き換えが出来ます。

## 3.3 テストプログラムの実行

今まで書き直してきましたが、それが正しくかつエラーが無いかは分かりません。そこで元のプログラムにあったテストプログラムを Java でも実行してみます。

```
1  private static void putdata(int nini, int nend, double [] a, double rnd)
2  {
3      int j;
4
5      for(j = nini;j <= nend;j++){
6          a[j] = rnd;
7      }
8  }
9
10 private static double errorcheck(int nini, int nend, double scale, double [] a, double rnd)
11 {
12     int j;
13     double err, e;
14     err = 0;
15
16     for(j = nini;j <= nend;j++){
17         e = rnd - a[j] * scale;
18         if(Math.abs(e) >= err){
19             err = Math.abs(e);
20         }
21     }
22     return err;
23 }
24
25 public static void main(String[] args){
26     int n, NMAX, NMAXSQRT;
27     double err, rnd, p;
28     int [] ip;
29     double [] a, w, t;
```

```
30
31      NMAX = 8192;
32      NMAXSQRT = 64;
33
34      ip = new int [NMAXSQRT + 2];
35      a = new double [NMAX + 1];
36      w = new double [NMAX * 5 / 4];
37      t = new double [NMAX / 2 + 1];
38
39      n = 1024;
40      p = Math.random();
41      rnd = ((p * 7141 + 54773 ) % 259200) * (1.0/259200.0);
42
43      ip[0] = 0;
44
45      putdata(0, n-1, a, rnd);
46      cdft(n, 1, a, ip, w);
47      cdft(n, -1, a, ip, w);
48      err = errorcheck(0, n-1, 2.0/n, a, rnd);
49      System.out.printf("cdft err = %g\n", err);
50
51      putdata(0, n-1, a, rnd);
52      rdft(n, 1, a, ip, w);
53      rdft(n, -1, a, ip, w);
54      err = errorcheck(0, n-1, 2.0/n, a, rnd);
55      System.out.printf("rdft err = %g\n", err);
56
57      putdata(0, n-1, a, rnd);
58      ddct(n, 1, a, ip, w);
59      ddct(n, -1, a, ip, w);
60      a[0] *= 0.5;
61      err = errorcheck(0, n-1, 2.0/n, a, rnd);
62      System.out.printf("ddct err = %g\n", err);
63
64      putdata(0, n-1, a, rnd);
65      ddst(n, 1, a, ip, w);
66      ddst(n, -1, a, ip, w);
67      a[0] *= 0.5;
68      err = errorcheck(0, n-1, 2.0/n, a, rnd);
69      System.out.printf("ddst err = %g\n", err);
70
71      putdata(0, n, a, rnd);
72      a[0] *= 0.5;
73      a[n] *= 0.5;
74      dfct(n, a, t, ip, w);
75      a[0] *= 0.5;
76      a[n] *= 0.5;
77      dfct(n, a, t, ip, w);
78      err = errorcheck(0, n, 2.0/n, a, rnd);
79      System.out.printf("dfct err = %g\n", err);
80
81      putdata(1, n-1, a, rnd);
82      dfst(n, a, t, ip, w);
83      dfst(n, a, t, ip, w);
84      err = errorcheck(1, n-1, 2.0/n, a, rnd);
85      System.out.printf("dfst err = %g\n", err);
86  }
```

内容はランダムで値をとり、各種変換を行いもとに戻したときに、一番誤差の大きい値を表示するものです。

```
1   cdft err = 0.00000
2   rdft err = 0.00000
3   ddct err = 2.22045e-16
4   ddst err = 2.49800e-16
5   dfct err = 0.00000
6   dfst err = 2.22045e-16
```

結果は上記のようになりほぼ誤差が無いことが分かります。
よって C → Java と移植できました。

# 第4章　音の読み込み方

## 4.1　はじめに

今回音のデータを読み込む時に桂田先生作の ReadWave.java (A.2 参照) と言うプログラムを使用しています。ここではプログラムの説明をしていきます。

## 4.2　使い方

次のようにコンパイル・実行します。

```
knoppix$ javac ReadWave.java
knoppix$ java ReadWave wave ファイル名
```

こうすると wave ファイルのデータがターミナル書き出されます。このままだと読み込んだデータを使いづらいので

```
knoppix$ java ReadWave wave ファイル名 > 適当な txt ファイル名
```

と実行します。こうする事によりデータが txt ファイルに書き出され、グラフ化することが楽になります。このデータに番号をつけて表示したものが 2 章最初の図となります。

## 4.3　小さなバグ

最初はデータが正しくないと言うことが起こりました。これは Java の Byte が符号付きであることが原因でした。

```
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]   | (abData[i+1] << 8));
78       right = (short)(abData[i+2] | (abData[i+3] << 8));
79       System.out.println("" + left + " " + right);
80   }
81   中略
```

元々はこの様なプログラムでしたが、このままでは値が合いません。次のように 4・5 行目に書き加えることにより問題は解決しました。

```
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  中略
```

# 付 録A　ソースプログラム

## A.1　fft4gRead.java

このプログラムは、Ooura's Mathematical Software Packages にある「汎用 FFT (高速 フーリエ/コサイン/サイン 変換) パッケージ」を Java に変換して使用しています。

次のようにしてコンパイル・実行します。

```
knoppix$ javac fft4gRead.java
knoppix$ java ft4gRead Wave ファイル名 > 適当な txt ファイル名
```

```
1   import java.io.*;
2   import java.io.File;
3   import javax.sound.sampled.*;
4
5   public class fft4gRead {
6       private static void cdft(int n, int isgn, double [] a, int [] ip, double [] w)
7       {
8           if (n > (ip[0] << 2)) {
9               makewt(n >> 2, ip, w);
10          }
11          if (n > 4) {
12              if (isgn >= 0) {
13                  bitrv2a(n, ip, a);
14                  cftfsub(n, a, w);
15              } else {
16                  bitrv2conj2(n, ip, a);
17                  cftbsub(n, a, w);
18              }
19          } else if (n == 4) {
20              cftfsub(n, a, w);
21          }
22      }
23
24      private static void rdft(int n, int isgn, double [] a, int [] ip, double [] w)
25      {
26          int nw, nc;
27          double xi;
28
29          nw = ip[0];
30          if (n > (nw << 2)) {
31              nw = n >> 2;
32              makewt(nw, ip, w);
33          }
34          nc = ip[1];
35          if (n > (nc << 2)) {
36              nc = n >> 2;
```

```
            makect2(nc, ip, w, nw);
        }
        if (isgn >= 0) {
            if (n > 4) {
                bitrv2a(n, ip, a);
                cftfsub(n, a, w);
                rftfsub2(n, a, nc, w, nw);
            } else if (n == 4) {
                cftfsub(n, a, w);
            }
            xi = a[0] - a[1];
            a[0] += a[1];
            a[1] = xi;
        } else {
            a[1] = 0.5 * (a[0] - a[1]);
            a[0] -= a[1];
            if (n > 4) {
                rftbsub2(n, a, nc, w, nw);
                bitrv2a(n, ip, a);
                cftbsub(n, a, w);
            } else if (n == 4) {
                cftfsub(n, a, w);
            }
        }
    }

    private static void ddct(int n, int isgn, double [] a, int [] ip, double [] w)
    {
        int j, nw, nc;
        double xr;

        nw = ip[0];
        if (n > (nw << 2)) {
            nw = n >> 2;
            makewt(nw, ip, w);
        }
        nc = ip[1];
        if (n > nc) {
            nc = n;
            makect2(nc, ip, w, nw);
        }
        if (isgn < 0) {
            xr = a[n - 1];
            for (j = n - 2; j >= 2; j -= 2) {
                a[j + 1] = a[j] - a[j - 1];
                a[j] += a[j - 1];
            }
            a[1] = a[0] - xr;
            a[0] += xr;
            if (n > 4) {
                rftbsub2(n, a, nc, w, nw);
                bitrv2a(n, ip, a);
                cftbsub(n, a, w);
            } else if (n == 4) {
                cftfsub(n, a, w);
            }
        }
        dctsub2(n, a, nc, w, nw);
```

```
95          if (isgn >= 0) {
96              if (n > 4) {
97                  bitrv2a(n, ip, a);
98                  cftfsub(n, a, w);
99                  rftfsub2(n, a, nc, w, nw);
100             } else if (n == 4) {
101                 cftfsub(n, a, w);
102             }
103             xr = a[0] - a[1];
104             a[0] += a[1];
105             for (j = 2; j < n; j += 2) {
106                 a[j - 1] = a[j] - a[j + 1];
107                 a[j] += a[j + 1];
108             }
109             a[n - 1] = xr;
110         }
111     }
112
113     private static void ddst(int n, int isgn, double [] a, int [] ip, double [] w)
114     {
115         int j, nw, nc;
116         double xr;
117
118         nw = ip[0];
119         if (n > (nw << 2)) {
120             nw = n >> 2;
121             makewt(nw, ip, w);
122         }
123         nc = ip[1];
124         if (n > nc) {
125             nc = n;
126             makect2(nc, ip, w, nw);
127         }
128         if (isgn < 0) {
129             xr = a[n - 1];
130             for (j = n - 2; j >= 2; j -= 2) {
131                 a[j + 1] = -a[j] - a[j - 1];
132                 a[j] -= a[j - 1];
133             }
134             a[1] = a[0] + xr;
135             a[0] -= xr;
136             if (n > 4) {
137                 rftbsub2(n, a, nc, w, nw);
138                 bitrv2a(n, ip, a);
139                 cftbsub(n, a, w);
140             } else if (n == 4) {
141                 cftfsub(n, a, w);
142             }
143         }
144         dstsub2(n, a, nc, w, nw);
145         if (isgn >= 0) {
146             if (n > 4) {
147                 bitrv2a(n, ip, a);
148                 cftfsub(n, a, w);
149                 rftfsub2(n, a, nc, w, nw);
150             } else if (n == 4) {
151                 cftfsub(n, a, w);
152             }
```

```
153             xr = a[0] - a[1];
154             a[0] += a[1];
155             for (j = 2; j < n; j += 2) {
156                 a[j - 1] = -a[j] - a[j + 1];
157                 a[j] -= a[j + 1];
158             }
159             a[n - 1] = -xr;
160         }
161     }
162
163     private static void dfct(int n, double [] a, double [] t, int [] ip, double [] w)
164     {
165         int j, k, l, m, mh, nw, nc;
166         double xr, xi, yr, yi;
167
168         nw = ip[0];
169         if (n > (nw << 3)) {
170             nw = n >> 3;
171             makewt(nw, ip, w);
172         }
173         nc = ip[1];
174         if (n > (nc << 1)) {
175             nc = n >> 1;
176             makect2(nc, ip, w, nw);
177         }
178         m = n >> 1;
179         yi = a[m];
180         xi = a[0] + a[n];
181         a[0] -= a[n];
182         t[0] = xi - yi;
183         t[m] = xi + yi;
184         if (n > 2) {
185             mh = m >> 1;
186             for (j = 1; j < mh; j++) {
187                 k = m - j;
188                 xr = a[j] - a[n - j];
189                 xi = a[j] + a[n - j];
190                 yr = a[k] - a[n - k];
191                 yi = a[k] + a[n - k];
192                 a[j] = xr;
193                 a[k] = yr;
194                 t[j] = xi - yi;
195                 t[k] = xi + yi;
196             }
197             t[mh] = a[mh] + a[n - mh];
198             a[mh] -= a[n - mh];
199             dctsub2(m, a, nc, w, nw);
200             if (m > 4) {
201                 bitrv2a(m, ip, a);
202                 cftfsub(m, a, w);
203                 rftfsub2(m, a, nc, w, nw);
204             } else if (m == 4) {
205                 cftfsub(m, a, w);
206             }
207             a[n - 1] = a[0] - a[1];
208             a[1] = a[0] + a[1];
209             for (j = m - 2; j >= 2; j -= 2) {
210                 a[2 * j + 1] = a[j] + a[j + 1];
```

```
211                 a[2 * j - 1] = a[j] - a[j + 1];
212             }
213             l = 2;
214             m = mh;
215             while (m >= 2) {
216                 dctsub2(m, t, nc, w, nw);
217                 if (m > 4) {
218                     bitrv2a(m, ip, t);
219                     cftfsub(m, t, w);
220                     rftfsub2(m, t, nc, w, nw);
221                 } else if (m == 4) {
222                     cftfsub(m, t, w);
223                 }
224                 a[n - l] = t[0] - t[1];
225                 a[l] = t[0] + t[1];
226                 k = 0;
227                 for (j = 2; j < m; j += 2) {
228                     k += l << 2;
229                     a[k - l] = t[j] - t[j + 1];
230                     a[k + l] = t[j] + t[j + 1];
231                 }
232                 l <<= 1;
233                 mh = m >> 1;
234                 for (j = 0; j < mh; j++) {
235                     k = m - j;
236                     t[j] = t[m + k] - t[m + j];
237                     t[k] = t[m + k] + t[m + j];
238                 }
239                 t[mh] = t[m + mh];
240                 m = mh;
241             }
242             a[l] = t[0];
243             a[n] = t[2] - t[1];
244             a[0] = t[2] + t[1];
245         } else {
246             a[1] = a[0];
247             a[2] = t[0];
248             a[0] = t[1];
249         }
250     }
251
252     private static void dfst(int n, double [] a, double [] t, int [] ip, double [] w)
253     {
254         int j, k, l, m, mh, nw, nc;
255         double xr, xi, yr, yi;
256
257         nw = ip[0];
258         if (n > (nw << 3)) {
259             nw = n >> 3;
260             makewt(nw, ip, w);
261         }
262         nc = ip[1];
263         if (n > (nc << 1)) {
264             nc = n >> 1;
265             makect2(nc, ip, w, nw);
266         }
267         if (n > 2) {
268             m = n >> 1;
```

```
269             mh = m >> 1;
270             for (j = 1; j < mh; j++) {
271                 k = m - j;
272                 xr = a[j] + a[n - j];
273                 xi = a[j] - a[n - j];
274                 yr = a[k] + a[n - k];
275                 yi = a[k] - a[n - k];
276                 a[j] = xr;
277                 a[k] = yr;
278                 t[j] = xi + yi;
279                 t[k] = xi - yi;
280             }
281             t[0] = a[mh] - a[n - mh];
282             a[mh] += a[n - mh];
283             a[0] = a[m];
284             dstsub2(m, a, nc, w, nw);
285             if (m > 4) {
286                 bitrv2a(m, ip, a);
287                 cftfsub(m, a, w);
288                 rftfsub2(m, a, nc, w, nw);
289             } else if (m == 4) {
290                 cftfsub(m, a, w);
291             }
292             a[n - 1] = a[1] - a[0];
293             a[1] = a[0] + a[1];
294             for (j = m - 2; j >= 2; j -= 2) {
295                 a[2 * j + 1] = a[j] - a[j + 1];
296                 a[2 * j - 1] = -a[j] - a[j + 1];
297             }
298             l = 2;
299             m = mh;
300             while (m >= 2) {
301                 dstsub2(m, t, nc, w, nw);
302                 if (m > 4) {
303                     bitrv2a(m, ip, t);
304                     cftfsub(m, t, w);
305                     rftfsub2(m, t, nc, w, nw);
306                 } else if (m == 4) {
307                     cftfsub(m, t, w);
308                 }
309                 a[n - l] = t[1] - t[0];
310                 a[l] = t[0] + t[1];
311                 k = 0;
312                 for (j = 2; j < m; j += 2) {
313                     k += l << 2;
314                     a[k - l] = -t[j] - t[j + 1];
315                     a[k + l] = t[j] - t[j + 1];
316                 }
317                 l <<= 1;
318                 mh = m >> 1;
319                 for (j = 1; j < mh; j++) {
320                     k = m - j;
321                     t[j] = t[m + k] + t[m + j];
322                     t[k] = t[m + k] - t[m + j];
323                 }
324                 t[0] = t[m + mh];
325                 m = mh;
326             }
```

```
327             a[l] = t[0];
328         }
329         a[0] = 0;
330     }
331
332     private static void makewt(int nw, int [] ip, double [] w)
333     {
334         int j, nwh;
335         double delta, x, y;
336
337         ip[0] = nw;
338         ip[1] = 1;
339         if (nw > 2) {
340             nwh = nw >> 1;
341             delta = Math.atan(1.0) / nwh;
342             w[0] = 1;
343             w[1] = 0;
344             w[nwh] = Math.cos(delta * nwh);
345             w[nwh + 1] = w[nwh];
346             if (nwh > 2) {
347                 for (j = 2; j < nwh; j += 2) {
348                     x = Math.cos(delta * j);
349                     y = Math.sin(delta * j);
350                     w[j] = x;
351                     w[j + 1] = y;
352                     w[nw - j] = y;
353                     w[nw - j + 1] = x;
354                 }
355                 bitrv2a(nw, ip, w);
356             }
357         }
358     }
359
360     private static void makect(int nc, int [] ip, double [] c)
361     {
362         int j, nch;
363         double delta;
364
365         ip[1] = nc;
366         if (nc > 1) {
367             nch = nc >> 1;
368             delta = Math.atan(1.0) / nch;
369             c[0] = Math.cos(delta * nch);
370             c[nch] = 0.5 * c[0];
371             for (j = 1; j < nch; j++) {
372                 c[j] = 0.5 * Math.cos(delta * j);
373                 c[nc - j] = 0.5 * Math.sin(delta * j);
374             }
375         }
376     }
377
378     private static void bitrv2(int n, int [] ip, double [] a)
379     {
380         int j, j1, k, k1, l, m, m2;
381         double xr, xi, yr, yi;
382
383         ip[0] = 0;
384         l = n;
```

```
385         m = 1;
386         while ((m << 3) < l) {
387             l >>= 1;
388             for (j = 0; j < m; j++) {
389                 ip[m + j] = ip[j] + l;
390             }
391             m <<= 1;
392         }
393         m2 = 2 * m;
394         if ((m << 3) == l) {
395             for (k = 0; k < m; k++) {
396                 for (j = 0; j < k; j++) {
397                     j1 = 2 * j + ip[k];
398                     k1 = 2 * k + ip[j];
399                     xr = a[j1];
400                     xi = a[j1 + 1];
401                     yr = a[k1];
402                     yi = a[k1 + 1];
403                     a[j1] = yr;
404                     a[j1 + 1] = yi;
405                     a[k1] = xr;
406                     a[k1 + 1] = xi;
407                     j1 += m2;
408                     k1 += 2 * m2;
409                     xr = a[j1];
410                     xi = a[j1 + 1];
411                     yr = a[k1];
412                     yi = a[k1 + 1];
413                     a[j1] = yr;
414                     a[j1 + 1] = yi;
415                     a[k1] = xr;
416                     a[k1 + 1] = xi;
417                     j1 += m2;
418                     k1 -= m2;
419                     xr = a[j1];
420                     xi = a[j1 + 1];
421                     yr = a[k1];
422                     yi = a[k1 + 1];
423                     a[j1] = yr;
424                     a[j1 + 1] = yi;
425                     a[k1] = xr;
426                     a[k1 + 1] = xi;
427                     j1 += m2;
428                     k1 += 2 * m2;
429                     xr = a[j1];
430                     xi = a[j1 + 1];
431                     yr = a[k1];
432                     yi = a[k1 + 1];
433                     a[j1] = yr;
434                     a[j1 + 1] = yi;
435                     a[k1] = xr;
436                     a[k1 + 1] = xi;
437                 }
438                 j1 = 2 * k + m2 + ip[k];
439                 k1 = j1 + m2;
440                 xr = a[j1];
441                 xi = a[j1 + 1];
442                 yr = a[k1];
```

```
                yi = a[k1 + 1];
                a[j1] = yr;
                a[j1 + 1] = yi;
                a[k1] = xr;
                a[k1 + 1] = xi;
            }
        } else {
            for (k = 1; k < m; k++) {
                for (j = 0; j < k; j++) {
                    j1 = 2 * j + ip[k];
                    k1 = 2 * k + ip[j];
                    xr = a[j1];
                    xi = a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 += m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                }
            }
        }
    }

    private static void bitrv2conj(int n, int [] ip, double [] a)
    {
        int j, j1, k, k1, l, m, m2;
        double xr, xi, yr, yi;

        ip[0] = 0;
        l = n;
        m = 1;
        while ((m << 3) < l) {
            l >>= 1;
            for (j = 0; j < m; j++) {
                ip[m + j] = ip[j] + l;
            }
            m <<= 1;
        }
        m2 = 2 * m;
        if ((m << 3) == l) {
            for (k = 0; k < m; k++) {
                for (j = 0; j < k; j++) {
                    j1 = 2 * j + ip[k];
                    k1 = 2 * k + ip[j];
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
```

```
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 += 2 * m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 -= m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 += 2 * m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                }
                k1 = 2 * k + ip[k];
                a[k1 + 1] = -a[k1 + 1];
                j1 = k1 + m2;
                k1 = j1 + m2;
                xr = a[j1];
                xi = -a[j1 + 1];
                yr = a[k1];
                yi = -a[k1 + 1];
                a[j1] = yr;
                a[j1 + 1] = yi;
                a[k1] = xr;
                a[k1 + 1] = xi;
                k1 += m2;
                a[k1 + 1] = -a[k1 + 1];
            }
        } else {
            a[1] = -a[1];
            a[m2 + 1] = -a[m2 + 1];
            for (k = 1; k < m; k++) {
                for (j = 0; j < k; j++) {
                    j1 = 2 * j + ip[k];
                    k1 = 2 * k + ip[j];
```

```
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 += m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                }
                k1 = 2 * k + ip[k];
                a[k1 + 1] = -a[k1 + 1];
                a[k1 + m2 + 1] = -a[k1 + m2 + 1];
            }
        }
    }

    private static void cftfsub(int n, double [] a, double [] w)
    {
        int j, j1, j2, j3, l;
        double x0r, x0i, x1r, x1i, x2r, x2i, x3r, x3i;

        l = 2;
        if (n > 8) {
            cft1st(n, a, w);
            l = 8;
            while ((l << 2) < n) {
                cftmdl(n, l, a, w);
                l <<= 2;
            }
        }
        if ((l << 2) == n) {
            for (j = 0; j < l; j += 2) {
                j1 = j + l;
                j2 = j1 + l;
                j3 = j2 + l;
                x0r = a[j] + a[j1];
                x0i = a[j + 1] + a[j1 + 1];
                x1r = a[j] - a[j1];
                x1i = a[j + 1] - a[j1 + 1];
                x2r = a[j2] + a[j3];
                x2i = a[j2 + 1] + a[j3 + 1];
                x3r = a[j2] - a[j3];
                x3i = a[j2 + 1] - a[j3 + 1];
                a[j] = x0r + x2r;
                a[j + 1] = x0i + x2i;
                a[j2] = x0r - x2r;
                a[j2 + 1] = x0i - x2i;
                a[j1] = x1r - x3i;
```

```
                a[j1 + 1] = x1i + x3r;
                a[j3] = x1r + x3i;
                a[j3 + 1] = x1i - x3r;
            }
        } else {
            for (j = 0; j < l; j += 2) {
                j1 = j + l;
                x0r = a[j] - a[j1];
                x0i = a[j + 1] - a[j1 + 1];
                a[j] += a[j1];
                a[j + 1] += a[j1 + 1];
                a[j1] = x0r;
                a[j1 + 1] = x0i;
            }
        }
    }

    private static void cftbsub(int n, double [] a, double [] w)
    {
        int j, j1, j2, j3, l;
        double x0r, x0i, x1r, x1i, x2r, x2i, x3r, x3i;

        l = 2;
        if (n > 8) {
            cft1st(n, a, w);
            l = 8;
            while ((l << 2) < n) {
                cftmdl(n, l, a, w);
                l <<= 2;
            }
        }
        if ((l << 2) == n) {
            for (j = 0; j < l; j += 2) {
                j1 = j + l;
                j2 = j1 + l;
                j3 = j2 + l;
                x0r = a[j] + a[j1];
                x0i = -a[j + 1] - a[j1 + 1];
                x1r = a[j] - a[j1];
                x1i = -a[j + 1] + a[j1 + 1];
                x2r = a[j2] + a[j3];
                x2i = a[j2 + 1] + a[j3 + 1];
                x3r = a[j2] - a[j3];
                x3i = a[j2 + 1] - a[j3 + 1];
                a[j] = x0r + x2r;
                a[j + 1] = x0i - x2i;
                a[j2] = x0r - x2r;
                a[j2 + 1] = x0i + x2i;
                a[j1] = x1r - x3i;
                a[j1 + 1] = x1i - x3r;
                a[j3] = x1r + x3i;
                a[j3 + 1] = x1i + x3r;
            }
        } else {
            for (j = 0; j < l; j += 2) {
                j1 = j + l;
                x0r = a[j] - a[j1];
                x0i = -a[j + 1] + a[j1 + 1];
```

```
                a[j] += a[j1];
                a[j + 1] = -a[j + 1] - a[j1 + 1];
                a[j1] = x0r;
                a[j1 + 1] = x0i;
            }
        }
    }

    private static void cft1st(int n, double [] a, double [] w)
    {
        int j, k1, k2;
        double wk1r, wk1i, wk2r, wk2i, wk3r, wk3i;
        double x0r, x0i, x1r, x1i, x2r, x2i, x3r, x3i;

        x0r = a[0] + a[2];
        x0i = a[1] + a[3];
        x1r = a[0] - a[2];
        x1i = a[1] - a[3];
        x2r = a[4] + a[6];
        x2i = a[5] + a[7];
        x3r = a[4] - a[6];
        x3i = a[5] - a[7];
        a[0] = x0r + x2r;
        a[1] = x0i + x2i;
        a[4] = x0r - x2r;
        a[5] = x0i - x2i;
        a[2] = x1r - x3i;
        a[3] = x1i + x3r;
        a[6] = x1r + x3i;
        a[7] = x1i - x3r;
        wk1r = w[2];
        x0r = a[8] + a[10];
        x0i = a[9] + a[11];
        x1r = a[8] - a[10];
        x1i = a[9] - a[11];
        x2r = a[12] + a[14];
        x2i = a[13] + a[15];
        x3r = a[12] - a[14];
        x3i = a[13] - a[15];
        a[8] = x0r + x2r;
        a[9] = x0i + x2i;
        a[12] = x2i - x0i;
        a[13] = x0r - x2r;
        x0r = x1r - x3i;
        x0i = x1i + x3r;
        a[10] = wk1r * (x0r - x0i);
        a[11] = wk1r * (x0r + x0i);
        x0r = x3i + x1r;
        x0i = x3r - x1i;
        a[14] = wk1r * (x0i - x0r);
        a[15] = wk1r * (x0i + x0r);
        k1 = 0;
        for (j = 16; j < n; j += 16) {
            k1 += 2;
            k2 = 2 * k1;
            wk2r = w[k1];
            wk2i = w[k1 + 1];
            wk1r = w[k2];
```

```
733             wk1i = w[k2 + 1];
734             wk3r = wk1r - 2 * wk2i * wk1i;
735             wk3i = 2 * wk2i * wk1r - wk1i;
736             x0r = a[j] + a[j + 2];
737             x0i = a[j + 1] + a[j + 3];
738             x1r = a[j] - a[j + 2];
739             x1i = a[j + 1] - a[j + 3];
740             x2r = a[j + 4] + a[j + 6];
741             x2i = a[j + 5] + a[j + 7];
742             x3r = a[j + 4] - a[j + 6];
743             x3i = a[j + 5] - a[j + 7];
744             a[j] = x0r + x2r;
745             a[j + 1] = x0i + x2i;
746             x0r -= x2r;
747             x0i -= x2i;
748             a[j + 4] = wk2r * x0r - wk2i * x0i;
749             a[j + 5] = wk2r * x0i + wk2i * x0r;
750             x0r = x1r - x3i;
751             x0i = x1i + x3r;
752             a[j + 2] = wk1r * x0r - wk1i * x0i;
753             a[j + 3] = wk1r * x0i + wk1i * x0r;
754             x0r = x1r + x3i;
755             x0i = x1i - x3r;
756             a[j + 6] = wk3r * x0r - wk3i * x0i;
757             a[j + 7] = wk3r * x0i + wk3i * x0r;
758             wk1r = w[k2 + 2];
759             wk1i = w[k2 + 3];
760             wk3r = wk1r - 2 * wk2r * wk1i;
761             wk3i = 2 * wk2r * wk1r - wk1i;
762             x0r = a[j + 8] + a[j + 10];
763             x0i = a[j + 9] + a[j + 11];
764             x1r = a[j + 8] - a[j + 10];
765             x1i = a[j + 9] - a[j + 11];
766             x2r = a[j + 12] + a[j + 14];
767             x2i = a[j + 13] + a[j + 15];
768             x3r = a[j + 12] - a[j + 14];
769             x3i = a[j + 13] - a[j + 15];
770             a[j + 8] = x0r + x2r;
771             a[j + 9] = x0i + x2i;
772             x0r -= x2r;
773             x0i -= x2i;
774             a[j + 12] = -wk2i * x0r - wk2r * x0i;
775             a[j + 13] = -wk2i * x0i + wk2r * x0r;
776             x0r = x1r - x3i;
777             x0i = x1i + x3r;
778             a[j + 10] = wk1r * x0r - wk1i * x0i;
779             a[j + 11] = wk1r * x0i + wk1i * x0r;
780             x0r = x1r + x3i;
781             x0i = x1i - x3r;
782             a[j + 14] = wk3r * x0r - wk3i * x0i;
783             a[j + 15] = wk3r * x0i + wk3i * x0r;
784         }
785     }
786
787     private static void cftmdl(int n, int l, double [] a, double [] w)
788     {
789         int j, j1, j2, j3, k, k1, k2, m, m2;
790         double wk1r, wk1i, wk2r, wk2i, wk3r, wk3i;
```

```
791         double x0r, x0i, x1r, x1i, x2r, x2i, x3r, x3i;
792
793         m = l << 2;
794         for (j = 0; j < l; j += 2) {
795             j1 = j + l;
796             j2 = j1 + l;
797             j3 = j2 + l;
798             x0r = a[j] + a[j1];
799             x0i = a[j + 1] + a[j1 + 1];
800             x1r = a[j] - a[j1];
801             x1i = a[j + 1] - a[j1 + 1];
802             x2r = a[j2] + a[j3];
803             x2i = a[j2 + 1] + a[j3 + 1];
804             x3r = a[j2] - a[j3];
805             x3i = a[j2 + 1] - a[j3 + 1];
806             a[j] = x0r + x2r;
807             a[j + 1] = x0i + x2i;
808             a[j2] = x0r - x2r;
809             a[j2 + 1] = x0i - x2i;
810             a[j1] = x1r - x3i;
811             a[j1 + 1] = x1i + x3r;
812             a[j3] = x1r + x3i;
813             a[j3 + 1] = x1i - x3r;
814         }
815         wk1r = w[2];
816         for (j = m; j < l + m; j += 2) {
817             j1 = j + l;
818             j2 = j1 + l;
819             j3 = j2 + l;
820             x0r = a[j] + a[j1];
821             x0i = a[j + 1] + a[j1 + 1];
822             x1r = a[j] - a[j1];
823             x1i = a[j + 1] - a[j1 + 1];
824             x2r = a[j2] + a[j3];
825             x2i = a[j2 + 1] + a[j3 + 1];
826             x3r = a[j2] - a[j3];
827             x3i = a[j2 + 1] - a[j3 + 1];
828             a[j] = x0r + x2r;
829             a[j + 1] = x0i + x2i;
830             a[j2] = x2i - x0i;
831             a[j2 + 1] = x0r - x2r;
832             x0r = x1r - x3i;
833             x0i = x1i + x3r;
834             a[j1] = wk1r * (x0r - x0i);
835             a[j1 + 1] = wk1r * (x0r + x0i);
836             x0r = x3i + x1r;
837             x0i = x3r - x1i;
838             a[j3] = wk1r * (x0i - x0r);
839             a[j3 + 1] = wk1r * (x0i + x0r);
840         }
841         k1 = 0;
842         m2 = 2 * m;
843         for (k = m2; k < n; k += m2) {
844             k1 += 2;
845             k2 = 2 * k1;
846             wk2r = w[k1];
847             wk2i = w[k1 + 1];
848             wk1r = w[k2];
```

```
849             wk1i = w[k2 + 1];
850             wk3r = wk1r - 2 * wk2i * wk1i;
851             wk3i = 2 * wk2i * wk1r - wk1i;
852             for (j = k; j < l + k; j += 2) {
853                 j1 = j + l;
854                 j2 = j1 + l;
855                 j3 = j2 + l;
856                 x0r = a[j] + a[j1];
857                 x0i = a[j + 1] + a[j1 + 1];
858                 x1r = a[j] - a[j1];
859                 x1i = a[j + 1] - a[j1 + 1];
860                 x2r = a[j2] + a[j3];
861                 x2i = a[j2 + 1] + a[j3 + 1];
862                 x3r = a[j2] - a[j3];
863                 x3i = a[j2 + 1] - a[j3 + 1];
864                 a[j] = x0r + x2r;
865                 a[j + 1] = x0i + x2i;
866                 x0r -= x2r;
867                 x0i -= x2i;
868                 a[j2] = wk2r * x0r - wk2i * x0i;
869                 a[j2 + 1] = wk2r * x0i + wk2i * x0r;
870                 x0r = x1r - x3i;
871                 x0i = x1i + x3r;
872                 a[j1] = wk1r * x0r - wk1i * x0i;
873                 a[j1 + 1] = wk1r * x0i + wk1i * x0r;
874                 x0r = x1r + x3i;
875                 x0i = x1i - x3r;
876                 a[j3] = wk3r * x0r - wk3i * x0i;
877                 a[j3 + 1] = wk3r * x0i + wk3i * x0r;
878             }
879             wk1r = w[k2 + 2];
880             wk1i = w[k2 + 3];
881             wk3r = wk1r - 2 * wk2r * wk1i;
882             wk3i = 2 * wk2r * wk1r - wk1i;
883             for (j = k + m; j < l + (k + m); j += 2) {
884                 j1 = j + l;
885                 j2 = j1 + l;
886                 j3 = j2 + l;
887                 x0r = a[j] + a[j1];
888                 x0i = a[j + 1] + a[j1 + 1];
889                 x1r = a[j] - a[j1];
890                 x1i = a[j + 1] - a[j1 + 1];
891                 x2r = a[j2] + a[j3];
892                 x2i = a[j2 + 1] + a[j3 + 1];
893                 x3r = a[j2] - a[j3];
894                 x3i = a[j2 + 1] - a[j3 + 1];
895                 a[j] = x0r + x2r;
896                 a[j + 1] = x0i + x2i;
897                 x0r -= x2r;
898                 x0i -= x2i;
899                 a[j2] = -wk2i * x0r - wk2r * x0i;
900                 a[j2 + 1] = -wk2i * x0i + wk2r * x0r;
901                 x0r = x1r - x3i;
902                 x0i = x1i + x3r;
903                 a[j1] = wk1r * x0r - wk1i * x0i;
904                 a[j1 + 1] = wk1r * x0i + wk1i * x0r;
905                 x0r = x1r + x3i;
906                 x0i = x1i - x3r;
```

```
                a[j3] = wk3r * x0r - wk3i * x0i;
                a[j3 + 1] = wk3r * x0i + wk3i * x0r;
            }
        }
    }

    private static void rftfsub(int n, double [] a, int nc, double [] c)
    {
        int j, k, kk, ks, m;
        double wkr, wki, xr, xi, yr, yi;

        m = n >> 1;
        ks = 2 * nc / m;
        kk = 0;
        for (j = 2; j < m; j += 2) {
            k = n - j;
            kk += ks;
            wkr = 0.5 - c[nc - kk];
            wki = c[kk];
            xr = a[j] - a[k];
            xi = a[j + 1] + a[k + 1];
            yr = wkr * xr - wki * xi;
            yi = wkr * xi + wki * xr;
            a[j] -= yr;
            a[j + 1] -= yi;
            a[k] += yr;
            a[k + 1] -= yi;
        }
    }

    private static void rftbsub(int n, double [] a, int nc, double [] c)
    {
        int j, k, kk, ks, m;
        double wkr, wki, xr, xi, yr, yi;

        a[1] = -a[1];
        m = n >> 1;
        ks = 2 * nc / m;
        kk = 0;
        for (j = 2; j < m; j += 2) {
            k = n - j;
            kk += ks;
            wkr = 0.5 - c[nc - kk];
            wki = c[kk];
            xr = a[j] - a[k];
            xi = a[j + 1] + a[k + 1];
            yr = wkr * xr + wki * xi;
            yi = wkr * xi - wki * xr;
            a[j] -= yr;
            a[j + 1] = yi - a[j + 1];
            a[k] += yr;
            a[k + 1] = yi - a[k + 1];
        }
        a[m + 1] = -a[m + 1];
    }

    private static void dctsub(int n, double [] a, int nc, double [] c)
    {
```

```
965         int j, k, kk, ks, m;
966         double wkr, wki, xr;
967 
968         m = n >> 1;
969         ks = nc / n;
970         kk = 0;
971         for (j = 1; j < m; j++) {
972             k = n - j;
973             kk += ks;
974             wkr = c[kk] - c[nc - kk];
975             wki = c[kk] + c[nc - kk];
976             xr = wki * a[j] - wkr * a[k];
977             a[j] = wkr * a[j] + wki * a[k];
978             a[k] = xr;
979         }
980         a[m] *= c[0];
981     }
982 
983     private static void dstsub(int n, double [] a, int nc, double [] c)
984     {
985         int j, k, kk, ks, m;
986         double wkr, wki, xr;
987 
988         m = n >> 1;
989         ks = nc / n;
990         kk = 0;
991         for (j = 1; j < m; j++) {
992             k = n - j;
993             kk += ks;
994             wkr = c[kk] - c[nc - kk];
995             wki = c[kk] + c[nc - kk];
996             xr = wki * a[k] - wkr * a[j];
997             a[k] = wkr * a[k] + wki * a[j];
998             a[j] = xr;
999         }
1000        a[m] *= c[0];
1001    }
1002 
1003    /* 追加 */
1004    private static void bitrv2a(int n, int [] ip, double [] a)
1005    {
1006        int j, j1, k, k1, l, m, m2;
1007        double xr, xi, yr, yi;
1008 
1009        ip[2] = 0;
1010        l = n;
1011        m = 1;
1012        while ((m << 3) < l) {
1013            l >>= 1;
1014            for (j = 0; j < m; j++) {
1015                ip[m + j + 2] = ip[j + 2] + l;
1016            }
1017            m <<= 1;
1018        }
1019        m2 = 2 * m;
1020        if ((m << 3) == l) {
1021            for (k = 0; k < m; k++) {
1022                for (j = 0; j < k; j++) {
```

```
                    j1 = 2 * j + ip[k + 2];
                    k1 = 2 * k + ip[j + 2];
                    xr = a[j1];
                    xi = a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 += 2 * m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 -= m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 += 2 * m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                }
                j1 = 2 * k + m2 + ip[k + 2];
                k1 = j1 + m2;
                xr = a[j1];
                xi = a[j1 + 1];
                yr = a[k1];
                yi = a[k1 + 1];
                a[j1] = yr;
                a[j1 + 1] = yi;
                a[k1] = xr;
                a[k1 + 1] = xi;
            }
        } else {
            for (k = 1; k < m; k++) {
                for (j = 0; j < k; j++) {
                    j1 = 2 * j + ip[k + 2];
                    k1 = 2 * k + ip[j + 2];
                    xr = a[j1];
```

```
                    xi = a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 += m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                }
            }
        }
    }

    private static void bitrv2conj2(int n, int [] ip, double [] a)
    {
        int j, j1, k, k1, l, m, m2;
        double xr, xi, yr, yi;

        ip[2] = 0;
        l = n;
        m = 1;
        while ((m << 3) < l) {
            l >>= 1;
            for (j = 0; j < m; j++) {
                ip[m + j + 2] = ip[j + 2] + l;
            }
            m <<= 1;
        }
        m2 = 2 * m;
        if ((m << 3) == l) {
            for (k = 0; k < m; k++) {
                for (j = 0; j < k; j++) {
                    j1 = 2 * j + ip[k + 2];
                    k1 = 2 * k + ip[j + 2];
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 += 2 * m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
```

```
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 -= m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 += 2 * m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                }
                k1 = 2 * k + ip[k + 2];
                a[k1 + 1] = -a[k1 + 1];
                j1 = k1 + m2;
                k1 = j1 + m2;
                xr = a[j1];
                xi = -a[j1 + 1];
                yr = a[k1];
                yi = -a[k1 + 1];
                a[j1] = yr;
                a[j1 + 1] = yi;
                a[k1] = xr;
                a[k1 + 1] = xi;
                k1 += m2;
                a[k1 + 1] = -a[k1 + 1];
            }
        } else {
            a[1] = -a[1];
            a[m2 + 1] = -a[m2 + 1];
            for (k = 1; k < m; k++) {
                for (j = 0; j < k; j++) {
                    j1 = 2 * j + ip[k + 2];
                    k1 = 2 * k + ip[j + 2];
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                    j1 += m2;
                    k1 += m2;
                    xr = a[j1];
                    xi = -a[j1 + 1];
```

```
                    yr = a[k1];
                    yi = -a[k1 + 1];
                    a[j1] = yr;
                    a[j1 + 1] = yi;
                    a[k1] = xr;
                    a[k1 + 1] = xi;
                }
                k1 = 2 * k + ip[k + 2];
                a[k1 + 1] = -a[k1 + 1];
                a[k1 + m2 + 1] = -a[k1 + m2 + 1];
            }
        }
    }

    private static void makect2(int nc, int [] ip, double [] c, int nw)
    {
        int j, nch;
        double delta;

        ip[1] = nc;
        if (nc > 1) {
            nch = nc >> 1;
            delta = Math.atan(1.0) / nch;
            c[nw] = Math.cos(delta * nch);
            c[nch + nw] = 0.5 * c[nw];
            for (j = 1; j < nch; j++) {
                c[j + nw] = 0.5 * Math.cos(delta * j);
                c[nc - j + nw] = 0.5 * Math.sin(delta * j);
            }
        }
    }

    private static void rftfsub2(int n, double [] a, int nc, double [] c, int nw)
    {
        int j, k, kk, ks, m;
        double wkr, wki, xr, xi, yr, yi;

        m = n >> 1;
        ks = 2 * nc / m;
        kk = 0;
        for (j = 2; j < m; j += 2) {
            k = n - j;
            kk += ks;
            wkr = 0.5 - c[nc - kk + nw];
            wki = c[kk + nw];
            xr = a[j] - a[k];
            xi = a[j + 1] + a[k + 1];
            yr = wkr * xr - wki * xi;
            yi = wkr * xi + wki * xr;
            a[j] -= yr;
            a[j + 1] -= yi;
            a[k] += yr;
            a[k + 1] -= yi;
        }
    }

    private static void rftbsub2(int n, double [] a, int nc, double [] c, int nw)
    {
```

```
1255            int j, k, kk, ks, m;
1256            double wkr, wki, xr, xi, yr, yi;
1257
1258            a[1] = -a[1];
1259            m = n >> 1;
1260            ks = 2 * nc / m;
1261            kk = 0;
1262            for (j = 2; j < m; j += 2) {
1263                k = n - j;
1264                kk += ks;
1265                wkr = 0.5 - c[nc - kk + nw];
1266                wki = c[kk + nw];
1267                xr = a[j] - a[k];
1268                xi = a[j + 1] + a[k + 1];
1269                yr = wkr * xr + wki * xi;
1270                yi = wkr * xi - wki * xr;
1271                a[j] -= yr;
1272                a[j + 1] = yi - a[j + 1];
1273                a[k] += yr;
1274                a[k + 1] = yi - a[k + 1];
1275            }
1276            a[m + 1] = -a[m + 1];
1277        }
1278
1279        private static void dctsub2(int n, double [] a, int nc, double [] c, int nw)
1280        {
1281            int j, k, kk, ks, m;
1282            double wkr, wki, xr;
1283
1284            m = n >> 1;
1285            ks = nc / n;
1286            kk = 0;
1287            for (j = 1; j < m; j++) {
1288                k = n - j;
1289                kk += ks;
1290                wkr = c[kk + nw] - c[nc - kk + nw];
1291                wki = c[kk + nw] + c[nc - kk + nw];
1292                xr = wki * a[j] - wkr * a[k];
1293                a[j] = wkr * a[j] + wki * a[k];
1294                a[k] = xr;
1295            }
1296            a[m] *= c[nw];
1297        }
1298
1299        private static void dstsub2(int n, double [] a, int nc, double [] c, int nw)
1300        {
1301            int j, k, kk, ks, m;
1302            double wkr, wki, xr;
1303
1304            m = n >> 1;
1305            ks = nc / n;
1306            kk = 0;
1307            for (j = 1; j < m; j++) {
1308                k = n - j;
1309                kk += ks;
1310                wkr = c[kk + nw] - c[nc - kk + nw];
1311                wki = c[kk + nw] + c[nc - kk + nw];
1312                xr = wki * a[k] - wkr * a[j];
```

```
            a[k] = wkr * a[k] + wki * a[j];
            a[j] = xr;
        }
        a[m] *= c[nw];
    }
    /* ここまで */

    private static final int EXTERNAL_BUFFER_SIZE = 128000;
    public static void main(String[] args){
        int frameSize;
        int sampleSizeInBits;
        int channels;
        float sampleRate;
        boolean isStereo;
        boolean isBigEndian;
        short [] a1, a2;
        int n, M, count, point;
        int [] ip;
        double wa, m;
        double [] a, b, w;
        a1 = new short [1280000];
        a2 = new short [1280000];
        M = 65536;
        count = 0;
        point = 39500;
        ip = new int [M+1];
        a = new double [M+1];
        b = new double [M+1];
        w = new double [M+1];
        if (args.length == 0) System.exit(0);
        try {
            File soundFile = new File(args[0]);
            AudioInputStream audioInputStream = AudioSystem.getAudioInputStream(soundFile);
            AudioFormat audioFormat = audioInputStream.getFormat();

            DataLine.Info info = new DataLine.Info(SourceDataLine.class,audioFormat);
            SourceDataLine line = (SourceDataLine) AudioSystem.getLine(info);
            line.open(audioFormat);
            line.start();

            channels = audioFormat.getChannels();
            isStereo = (channels == 2);
            isBigEndian = audioFormat.isBigEndian();
            frameSize = audioFormat.getFrameSize();
            sampleSizeInBits = audioFormat.getSampleSizeInBits();
            sampleRate = audioFormat.getSampleRate();
            System.out.println("#original file: " + args[0]);
            System.out.println("#number of channels: " + channels);
            System.out.println("#sampling rate: " + sampleRate);
            System.out.println("#number of bits per sample: " + sampleSizeInBits);
            System.out.println("#FrameSize: " + frameSize);
            System.out.println("#isBigEndian: " + isBigEndian);
            if (audioFormat.getEncoding() == AudioFormat.Encoding.PCM_SIGNED) {
                System.out.println("#PCM Signed");
            }
            else if (audioFormat.getEncoding() == AudioFormat.Encoding.PCM_UNSIGNED) {
                System.out.println("#PCM Unsigned!!!");
                System.exit(0);
```

```
1371            }
1372            else {
1373                System.out.println("#NO PCM!!");
1374                System.exit(0);
1375            }
1376
1377            int nBytesRead = 0;
1378            byte[] abData = new byte[EXTERNAL_BUFFER_SIZE];
1379            if (isStereo) {
1380                if (sampleSizeInBits == 16) {
1381                    while (nBytesRead != -1) {
1382                        nBytesRead = audioInputStream.read(abData, 0, abData.length);
1383                        if (nBytesRead >= 0) {
1384                            int nBytesWritten = line.write(abData, 0, nBytesRead);
1385                            for (int i = 0; i < nBytesRead; i += 4) {
1386                                short left, right;
1387                                ++count;
1388                                left  = (short)(abData[i  ] & 0xff | (abData[i+1] << 8));
1389                                right = (short)(abData[i+2] & 0xff | (abData[i+3] << 8));
1390                                a1[count] = left;
1391                                a2[count] = right;
1392                            }
1393                        }
1394                    }
1395                }
1396                else {
1397                    while (nBytesRead != -1) {
1398                        nBytesRead = audioInputStream.read(abData, 0, abData.length);
1399                        if (nBytesRead >= 0) {
1400                            int nBytesWritten = line.write(abData, 0, nBytesRead);
1401                            for (int i = 0; i < nBytesRead; i += 2) {
1402                                short left, right;
1403                                ++count;
1404                                left  = (short)(abData[i]   & 0xff);
1405                                right = (short)(abData[i+1] & 0xff);
1406                                a1[count] = left;
1407                                a2[count] = right;
1408                            }
1409                        }
1410                    }
1411                }
1412            }
1413            else {
1414                if (sampleSizeInBits == 16) {
1415                    while (nBytesRead != -1) {
1416                        nBytesRead = audioInputStream.read(abData, 0, abData.length);
1417                        if (nBytesRead >= 0) {
1418                            int nBytesWritten = line.write(abData, 0, nBytesRead);
1419                            for (int i = 0; i < nBytesRead; i += 2) {
1420                                short c = (short)(abData[i] &0xff | (abData[i+1] << 8));
1421                                ++count;
1422                                a1[count] = c;
1423                            }
1424                        }
1425                    }
1426                }
1427                else {
1428                    while (nBytesRead != -1) {
```

```
                        nBytesRead = audioInputStream.read(abData, 0, abData.length);
                        if (nBytesRead >= 0) {
                            int nBytesWritten = line.write(abData, 0, nBytesRead);
                            for (int i = 0; i < nBytesRead; i++) {
                                short c;
                                ++count;
                                c = (short)(abData[i] & 0xff);
                                a1[count] = c;
                            }
                        }
                    }
                }
            }
            for(n = 0;n <= M;n++){
                a[n] = (double)(a1[n+point]);
            }
            rdft(M, 1, a, ip, w);
            for(n = 1;n <= M/2-1;n++){
                wa = (2.0/M) * (2.0/M) * (a[2*n] * a[2*n] + a[2*n+1] * a[2*n+1]);
                m = (double)(n * 44100) / (double)(M);
                System.out.printf("%f %f\n", m, Math.abs(wa));
            }
            line.drain();
            line.close();

            System.exit(0);
        } catch (Exception e) {
            e.printStackTrace();
            System.exit(1);
        }
    }
}
```

## A.2 ReadWave.java

```
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   }
```

# 参考文献


[1] 大浦 拓哉, Ooura's Mathematical Software Packages, http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~ooura/index-j.html

[2] 三井 康之, Java による波動方程式の数値解析, 2001 年度桂田研卒業研究, http://www.math.meiji.ac.jp/~mk/labo/pdf/2001-mitsui.pdf

[3] 田中 宏和, Java で HelloWorld, http://www.hellohiro.com/

[4] 奥村 晴彦, LaTeX2ε 美文書作成入門, 技術評論社

[5] 戸川 隼人, 演習と応用 Java, サイエンス社