音のプログラミング第1回

音の作成と合成

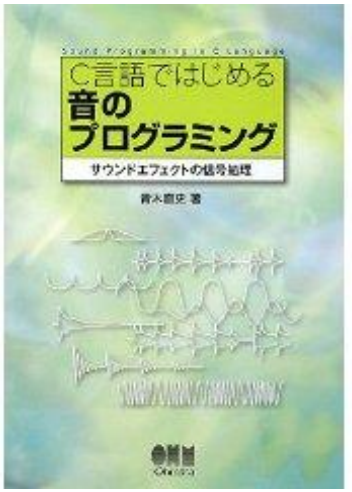
鹿児島大学工学部
渕田孝康

目的

- 音の仕組みを知る
  - 音のデジタル化
  - 振幅と周波数
  - サンプリング周波数
  - サンプリングビット数
- 音の作成
  - エクセルを用いた音の作成と表示
  - プログラムを用いた音の作成
- 音の合成
  - エクセルを用いた音の合成と表示
  - プログラムを用いた音の合成

参考書

- C言語ではじめる音のプログラミング
  - サウンドエフェクトの信号処理
- 青木直史著
- オーム社
- 2008年初版、2021年第13刷
- 定価2,600円（税別）
- ウェブサイト
  - http://floor13.sakura.ne.jp/book03/book03.html
  - プログラムなどダウンロード可能
  - BCC32を使用



コンピュータでの音処理

- AD変換
  - マイクで音圧取得：アナログ情報
  - LPFで高周波をカット
    - エイリアス歪みを抑制
  - 標本化：一定間隔でアナログ情報を計測
  - 量子化：デジタル信号へ変換（PCMデータ）
- DA変換
  - 逆量子化：数値データ
  - LPFで高周波をカット
  - スピーカーで音圧再生：アナログ情報

具体例

- AD変換
  - マイクから録音
  - ボイスレコーダー
    - m4aフォーマット（圧縮データ）
  - 仮面舞踏会アプリ
    - wavフォーマット（PCMデータ）
    - 初期のサウンドレコーダーはwavフォーマットで保存できたが、最近のボイスレコーダーは不可能
- DA変換
  - スピーカーから再生
  - Windows Media Player
    - さまざまなフォーマットの音を再生可能

課題1

1. 仮面舞踏会アプリをインストールせよ
   - https://www.vector.co.jp/soft/win95/art/se268485.html
   - baile4_9_4.zipを展開してZ:の適当な場所に置くだけ
   - フォルダbaile4_9_4の中のbaile.exeがアプリ
   - デスクトップにショートカットを作っておくと便利
2. 保存フォルダの変更
   - 「設定」⇒「基本設定」から、WAVE保存先を変更できる（あとで）
3. 1〜2秒の自分の声を録音せよ
   - 録音ボタンを押す
   - マイクに向かって話す
   - 停止ボタンを押す
4. 録音を確認せよ
   - PCMデータは、実行ファイルがあるフォルダのWAVEフォルダにある
   - フォーマットは.wav
   - ダブルクリックすると再生

C++コンパイラbcc32

- 元Borland社のC++コンパイラ
  - 現在は買収されてMicro Focus社
- Embarcadero社のHPからダウンロード可能
  - https://www.embarcadero.com/jp/free-tools/ccompiler
  - 姓、名、メール等を入力してダウンロード
  - BCC102.zip
  - 展開するとBCC102フォルダができる
  - Z:の適当な場所に移動する
  - その中のbinフォルダにPathを通す
    - Pathの通し方が分からない場合は「Windows10 Path」で検索
    - ついでにカレントフォルダへもPathを通すこと
- 確認
  - コマンドプロンプトを開き、bcc32cと入力
  - エラーが出たらOK

```
SoundProgramming>bcc32c
Embarcadero C++ 7.30 for Win32 Copyright (c) 2012-2017 Embarcadero Technologies, Inc.
bcc32c.exe: error: no input files

SoundProgramming>
```

課題2

- bcc32をインストールせよ
  - 前のスライドを参考にすること
- フォルダ作成
  - Z:の適当な場所にSoundProgrammingフォルダを作成
- test1を作成、コンパイル、実行
  - その中にtest1.cという空のテキストファイルを作成
  - 右図のコードを入力
  - コンパイルして実行を確認（下図）
    - コンパイラはbcc32c
    - 黄色のコマンドを入力する

```
#include <stdio.h>

int main(){
  printf("Hello Sound Programming!¥n");
}
```

```
SoundProgramming>bcc32c test1.c
Embarcadero C++ 7.30 for Win32 Copyright (c) 2012-2017 Embarcadero Technologies, Inc.
test1.c:
Turbo Incremental Link 6.90 Copyright (c) 1997-2017 Embarcadero Technologies, Inc.

SoundProgramming>test1
Hello Sound Programming!

SoundProgramming>
```

実行結果！

WAVEファイル

- 音をサンプリングした生のデータを格納したファイル
- ヘッダ部
  - 標本化周波数 samplesPerSec
  - 量子化精度 bitsPerSample
  - 音データ長 dataChunkSize
  - など
- データ部
  - PCMデータが並んでいる
  - -32768～+32767の整数値
    - 16ビット＝2バイト
    - 16進数で2桁


```
2a 00 e8 00 6c 00 28 02  40 00 f6 01 9f 00 96 02
89 00 d5 02 fd ff 7e 02  46 00 1b 02 3e 00 6c 02
f8 ff a8 02 d9 ff 88 02  e6 ff 76 02 1c 00 5d 02
...
```

wave.h

- PCMファイルを扱うヘッダ
- 2つの型
  - MONO_PCM：モノラル音声データ
  - STEREO_PCM：ステレオ音声データ
- 4つの関数
  - void mono_wave_read(pcm,name)：モノラル音声読み込み
  - void mono_wave_write(pcm,name)：モノラル音声書き込み
  - void stereo_wave_read(pcm,name)：ステレオ音声読み込み
  - void stereo_wave_write(pcm,name)：ステレオ音声書き込み
  - 引数
    - pcm : MONO_PCM(またはSTEREO_PCM)のポインタ
    - name : ファイル名へのポインタ
- 2ページの参考文献のサポートサイトから入手
  - http://floor13.sakura.ne.jp/book03/book03.html
  - chapter01.zipをダウンロードして展開
  - chapter01/chapter01/ex1_1/wave.h
  - ただし修正が必要：144,281,295行目の `(short)` を `(int)` に変更する

音の型

MONO_PCM

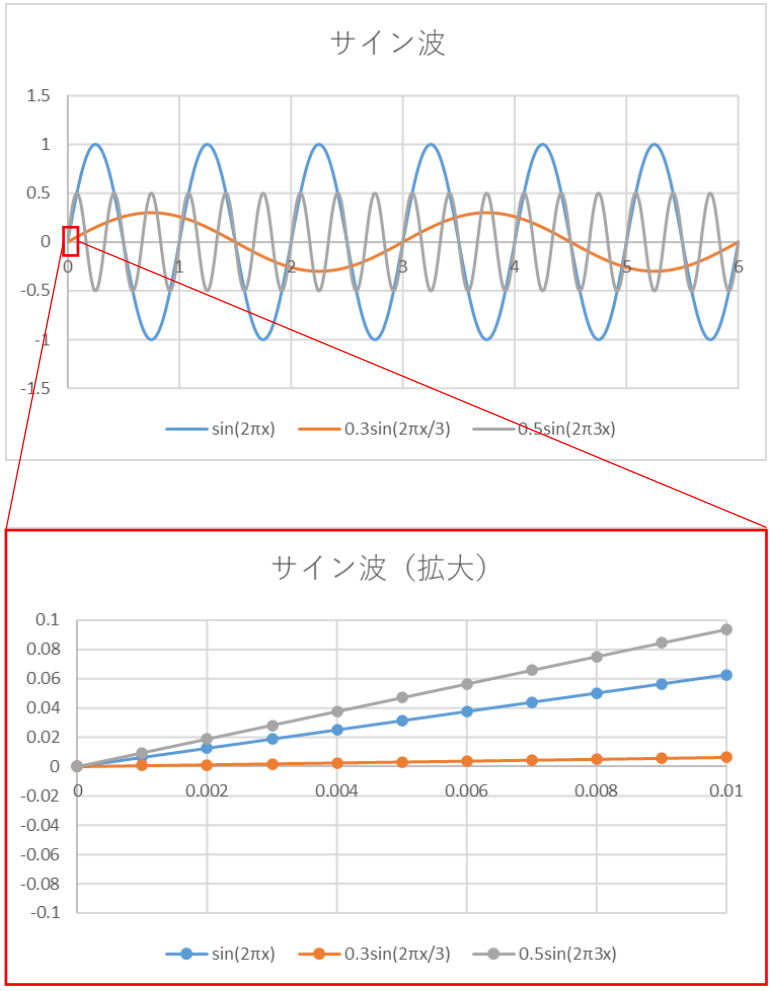
```
typedef struct
{
  int fs; /* 標本化周波数 */
  int bits; /* 量子化精度 */
  int length; /* 音データの長さ */
  double *s; /* 音データ */
} MONO_PCM;
```

STEREO_PCM

```
typedef struct
{
  int fs; /* 標本化周波数 */
  int bits; /* 量子化精度 */
  int length; /* 音データの長さ */
  double *sL; /* 音データ（Lチャンネル） */
  double *sR; /* 音データ（Rチャンネル） */
} STEREO_PCM;
```

音を作る

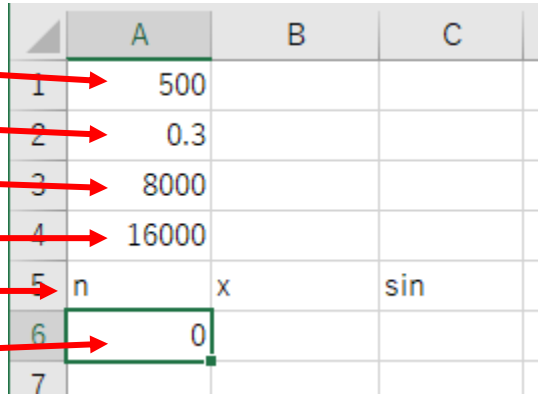
- 音は空気の振動＝波
- 音を作る＝波形を作る
- もっとも単純な波形＝サイン波
  - $w(x) = \sin 2\pi x$
    - 振幅1、周期1、周波数1 （$f = 1/T$）
  - $w(x) = 0.5 \sin 2\pi 3x$
    - 振幅0.3、周期1/3、周波数3
  - $w(x) = 0.3 \sin \frac{2\pi x}{3} = 0.3 \sin 2\pi \frac{1}{3} x$
    - 振幅0.3、周期3、周波数1/3
  - $w(x) = A \sin \frac{2\pi x}{T} = A \sin 2\pi f x$
    - 振幅A、周期T、周波数$f = 1/T$
- 離散的なサイン波
  - 変数xの刻み幅が離散的
  - 右図では0.001刻み
    - サンプリング周波数が1000Hz=1kHz
  - 1秒で1000回サンプリングすること



エクセルで音を作る①

- サイン波を作るために必要なデータ
  - 周波数f
  - 振幅A
  - サンプリング周波数f_s
  - 系列長L
  - 時刻$x = \frac{0}{f_s}, \frac{1}{f_s}, \frac{2}{f_s}, \cdots, \frac{L-1}{f_s}$
  - 波形$w(x) = A \sin 2\pi f x$
- エクセルファイルを作成 "wave1.xlsx"
  - A1：500（周波数）
  - A2：0.3（振幅）
  - A3：8000（サンプリング周波数）
  - A4：16000（系列長）
  - A5,B5,C5に"n","x","sin"と入力
  - A6に0を入力

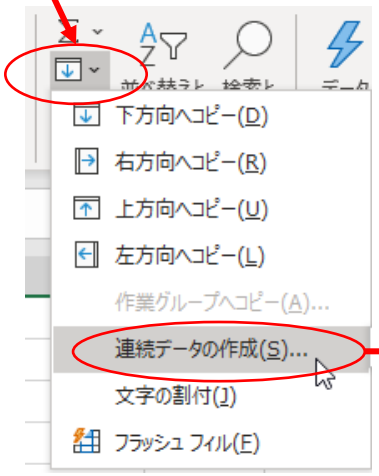
"wave1.xlsx"

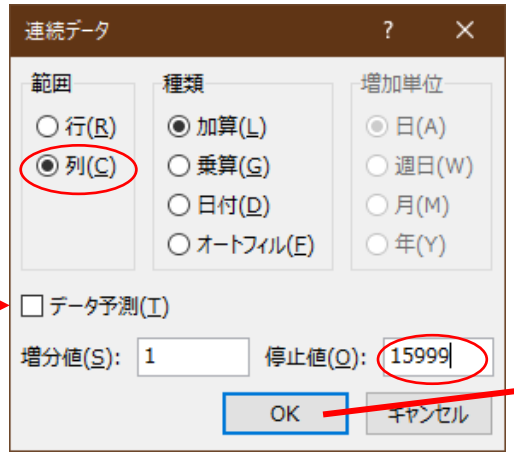


エクセルで音を作る②

	A	B	C
1	500		
2	0.3		
3	8000		
4	16000		
5	n	x	sin
6	0		
7			

連続データ生成機能を用いて、
0から15999までの16000個の
系列データを生成する





	A	B	C
1	500		
2	0.3		
3	8000		
4	16000		
5	n	x	sin
6	0		
7	1		
8	2		
9	3		
15999	15993		
16000	15994		
16001	15995		
16002	15996		
16003	15997		
16004	15998		
16005	15999		
16006			
16007			

16000個の連続データができた

エクセルで音を作る③

B列にxを、C列にサイン波を作る

	A	B	C
1	500		
2	0.3		
3	8000		
4	16000		
5	n	x	sin
6	0	=A6/$A$3	

f_s

$$x = \frac{0}{f_s}, \frac{1}{f_s}, \frac{2}{f_s}, \cdots, \frac{L-1}{f_s}$$

	A	B	C
1	500		
2	0.3		
3	8000		
4	16000		
5	n	x	sin
6	0	0	0
7	1		
8	2		
9	3		

	A	B	C	D
1	500			
2	0.3			
3	8000			
4	16000			
5	n	x	sin	
6	0	0	=$A$2*SIN(2*PI()*$A$1*$B6)	

f

A

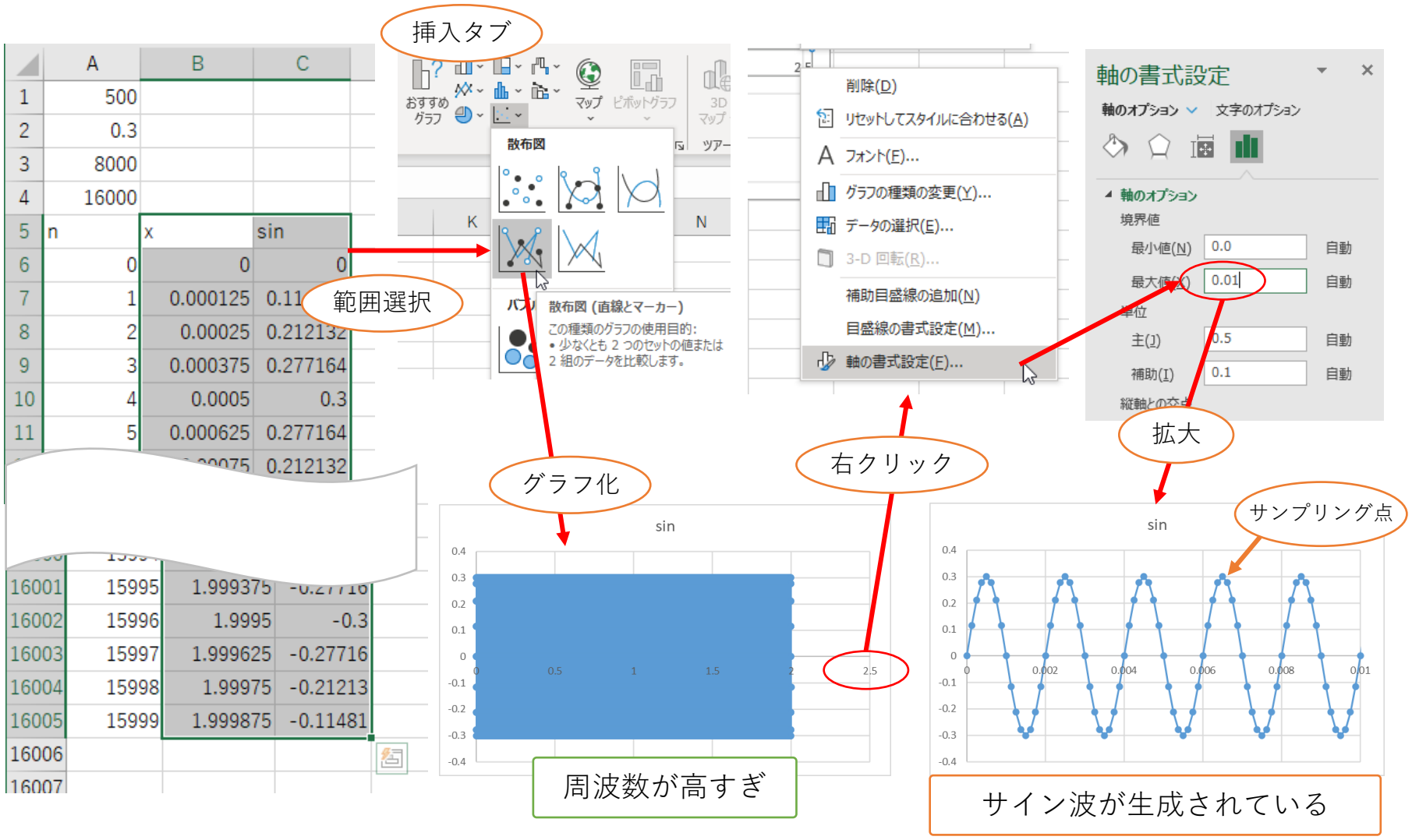
$$w(x) = A \sin 2\pi f x$$

下へコピー

	A	B	C
1	500		
2	0.3		
3	8000		
4	16000		
5	n	x	sin
6	0	0	0
7	1	0.000125	0.114805
8	2	0.00025	0.212132
9	3	0.000375	0.277164
		0.0005	0.3
16000	15994	1.99925	-0.21213
16001	15995	1.999375	-0.27716
16002	15996	1.9995	-0.3
16003	15997	1.999625	-0.27716
16004	15998	1.99975	-0.21213
16005	15999	1.999875	-0.11481
16006			

サイン波の離散データ完成

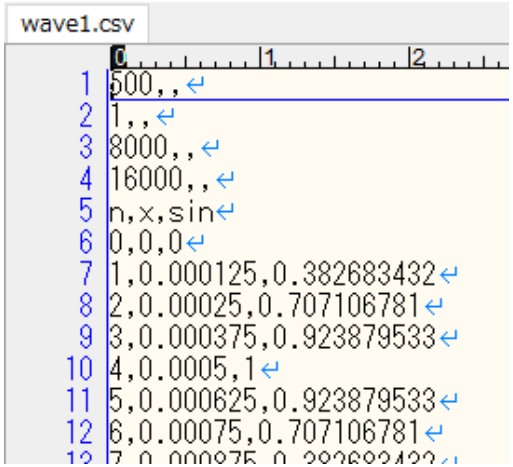
音を見る



	A	B	C
1	500		
2	0.3		
3	8000		
4	16000		
5	n	x	sin
6	0	0	0
7	1	0.000125	0.11
8	2	0.00025	0.212132
9	3	0.000375	0.277164
10	4	0.0005	0.3
11	5	0.000625	0.277164
			0.212132
16001	15995	1.999375	
16002	15996	1.9995	-0.3
16003	15997	1.999625	-0.27716
16004	15998	1.99975	-0.21213
16005	15999	1.999875	-0.11481
16006			
16007			

CSVで保存

- まずエクセルブックを保存
  - 保存ボタンを押すだけ
- CSV形式
  - 単純なテキストであり、いろいろなプログラムで利用可能
  - テキストデータならば形式が簡単で扱いやすい
  - エクセルでもそのまま扱える
    - ただし、図や書式は保存されないので注意
  - バイナリ形式と比較するとサイズが大きい
- データをCSV形式で保存
  - 「ファイル」⇒「名前を付けて保存」
  - 形式を「CSV(コンマ区切り) (*.csv)」に変更
  - "wave1.csv"で保存
  - 警告が出るのでOKを押して単一シートのみを保存
  - 保存したCSVファイルをテキストエディタで見ると、図のように各列がカンマで区切られて並んでいる



音への変換

- CSVファイルからWAVEファイルへ変換する
  - csv2wav csv wav
- CSVファイルはエクセルから保存したもの
  - 1行目：周期（読み飛ばす）
  - 2行目：振幅（読み飛ばす）
  - 3行目：サンプリング周波数fs
  - 4行目：系列長length
  - 5行目：ヘッダ（読み飛ばす）
  - 6行目以降
    - 3つの数値が並んでいる
    - 3つ目がデータ
    - 1つ目と2つ目を読み飛ばすためにダミーの変数n,xを使っている
- WAVEファイルへの保存
  - mono_wave_save()関数
- コンパイル

  > bcc32c csv2wav.c
- 実行

  > csv2wav wave1.csv wave1.wav

csv2wav.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "wave.h"

int main(int argc,char **argv){
  int N=300;
  MONO_PCM pcm;

  // 引数チェック
  if(argc!=3){
    fprintf(stderr,"Usage: fromCSV csv wave¥n");
    exit(1);
  }

  // CSVデータの読み込み
  char buf[N];
  FILE *fp=fopen(argv[1],"rt");
  fgets(buf,N,fp);  // 周波数読み飛ばし
  fgets(buf,N,fp);  // 振幅読み飛ばし
  pcm.fs=atoi(fgets(buf,N,fp)); // サンプリング周波数
  pcm.bits=16; // 量子化ビット数（16に固定）
  pcm.length=atoi(fgets(buf,N,fp)); // 系列長
  fgets(buf,N,fp);  // ヘッダの読み飛ばし
  pcm.s=malloc(pcm.length*sizeof(double));
  int n; // n用
  double x; // x用
  for(int i=0;i<pcm.length;i++){
    fgets(buf,N,fp);
    sscanf(buf,"%d,%lf,%lf",&n,&x,&pcm.s[i]);
  }
  fclose(fp);

  // WAVEデータの保存
  mono_wave_write(&pcm,argv[2]);

  free(pcm.s);
}
```

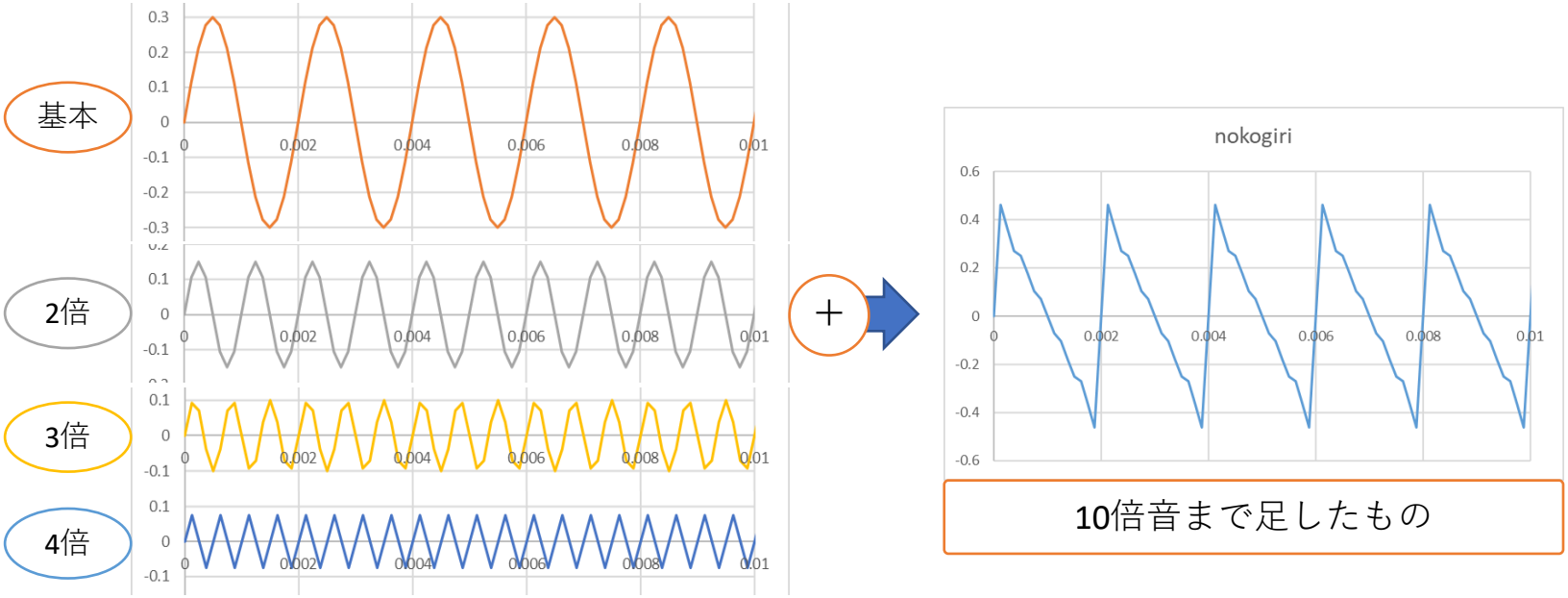
課題3

1. 作成したサイン波を音として再生せよ
   - 保存したWAVEファイルをダブルクリック
   - Windows Media Playerで再生する
   - どんな音が再生されたか述べよ
2. 楽器の音階を再現せよ。
   - 各音階の周波数とファイル名は右表のとおり
   - 8つのファイルに音データを保存し、Media Playerで連続的に再生せよ
     - wave1.xlsxの周波数を変更しつつCSVファイルに保存し、それをWAVファイルに変換すること
3. 各音の長さを1秒にするにはエクセルファイルのどこを変えればよいか説明せよ。

音階	周波数	ファイル名
ド	523Hz	wave1-1.wav
レ	587Hz	wave1-2.wav
ミ	659Hz	wave1-3.wav
ファ	698Hz	wave1-4.wav
ソ	783Hz	wave1-5.wav
ラ	880Hz	wave1-6.wav
シ	988Hz	wave1-7.wav
ド	1047Hz	wave1-8.wav

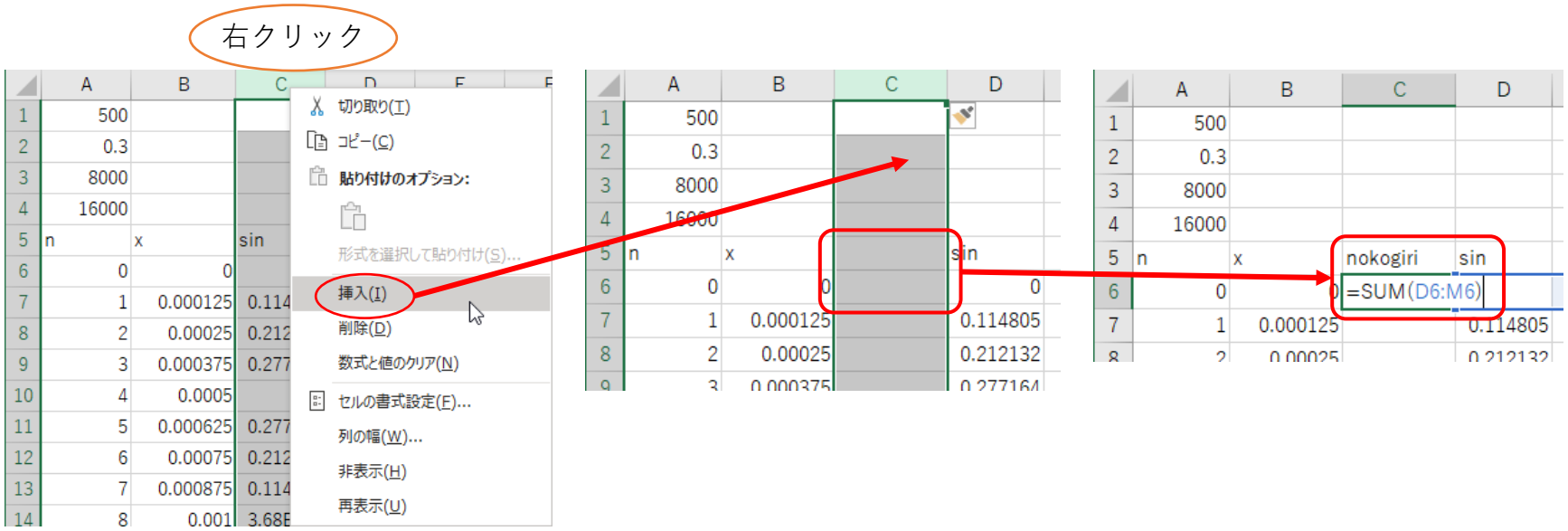
音の合成

- サイン波の周波数と振幅を変化させつつ波を足し合わせる
  $S(f, A)$：周波数f、振幅Aのサイン波
- ノコギリ波
  - 周波数2倍、3倍・・・、振幅1/2倍、1/3倍・・・の波を足し合わせる
  - $N = S(f, A) + S\left(2f, \frac{A}{2}\right) + S\left(3f, \frac{A}{3}\right) + S\left(4f, \frac{A}{4}\right) + \cdots$

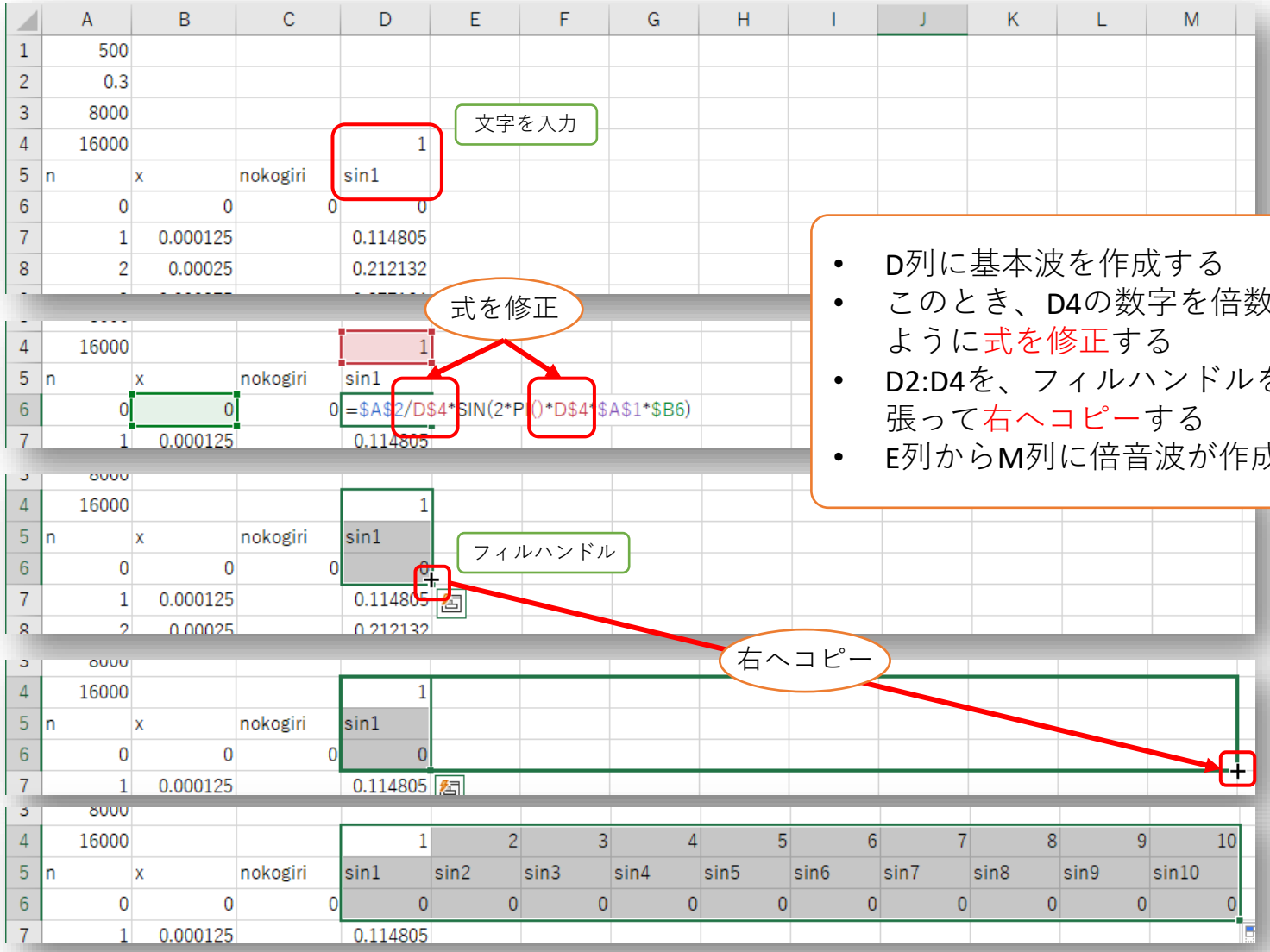


エクセルによる音の合成①

- wave1.xlsxをコピーしてwave2.xlsxを作る
  - グラフは削除しておく
- C列を挿入し、ノコギリ波を作る場所を空ける
- D列からM列までに基本波、2倍波、3倍波・・・10倍波を作ることにする
- C6にD6からM6までの和を計算する

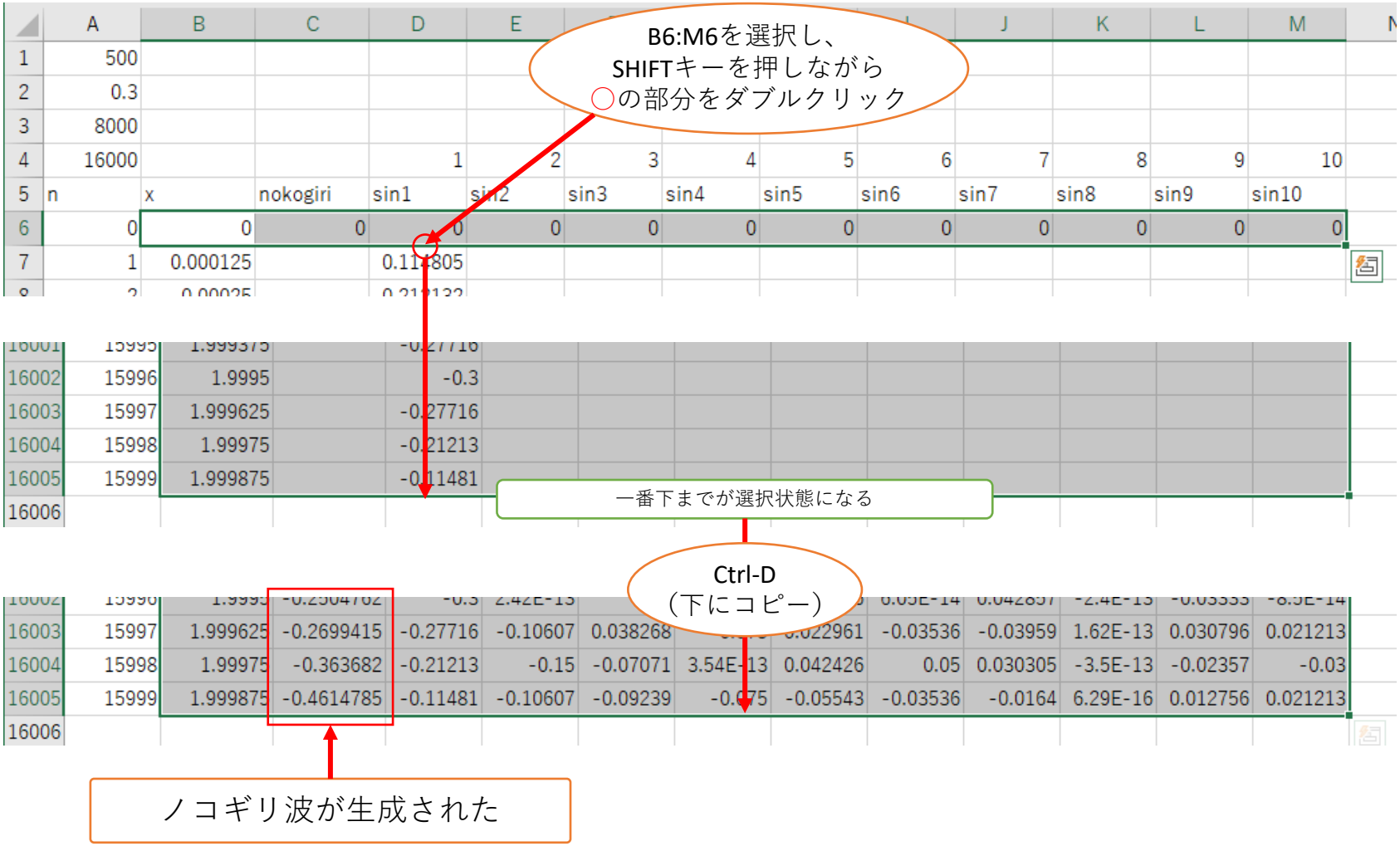


エクセルによる音の合成②



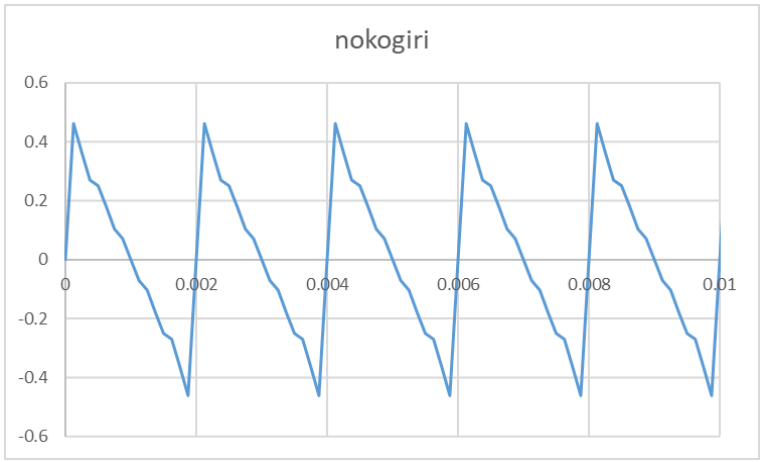
- D列に基本波を作成する
- このとき、D4の数字を倍数とするように式を修正する
- D2:D4を、フィルハンドルを引っ張って右へコピーする
- E列からM列に倍音波が作成される

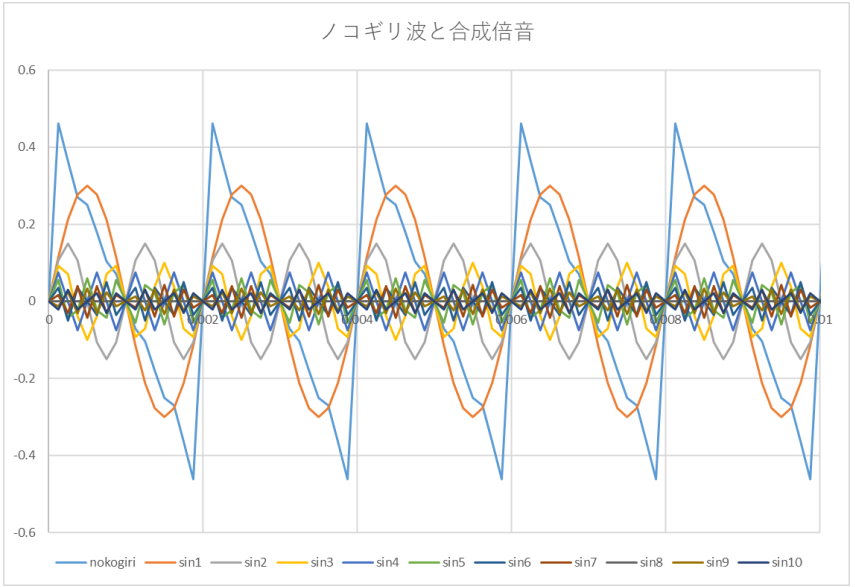
エクセルによる音の合成③



波形の確認

- 作成したノコギリ波をグラフ化する
  - "x"と"nokogiri"の列を選択
    - "x"と"nokogiri"の2つを選択し、シフトキーを押しながら下線をダブルクリック
  - 「挿入」⇒「グラフ」⇒「散布図（直線）」
  - 横軸を右クリックし最大値を0.01に
- 合成した波形全部のグラフ化も同様に可能





課題4

1. エクセルで以下のノコギリ波を生成し再生せよ
   - 周波数880Hz
   - 振幅0.5
   - 長さ2秒
   - ファイル名：wave2.wav
2. 矩形波とはサイン波の奇数倍音だけの和として以下のように計算される
   - $R = S(f, A) + S\left(3f, \frac{A}{3}\right) + S\left(5f, \frac{A}{5}\right) + \cdots$
   - エクセルでwave3.xlsxを作り、矩形波を以下の矩形波を生成し再生せよ
     - 周波数880Hz
     - 振幅0.5
     - 長さ2秒
     - ファイル名：wave3.wav
3. それぞれの音を聞き、自分が感じた特徴を述べよ

プログラムによる音の生成

- C言語のプログラムで音を生成する
- サイン波を作るために必要なデータ
  - 振幅A
  - 周波数f
  - サンプリング周波数f_s
  - 系列長L
  - 時刻$x = \frac{0}{f_s}, \frac{1}{f_s}, \frac{2}{f_s}, \cdots, \frac{L-1}{f_s}$
  - 波形$w(x) = A \sin 2\pi f x$
- 波形$w(x)$の値を作ればよい
  - 振幅0.3
  - 周波数500Hz
  - サンプリング周波数8000
  - 量子化ビット数16
  - 音の長さ16000（＝2秒）
  - MONO_PCM型の配列sに入れる
- 右図のプログラム"makeSinWave.c"

```
> bcc32c makeSinWave.c
> makeSinWave test1.wav
```

```
typedef struct
{
  int fs; /* 標本化周波数 */
  int bits; /* 量子化精度 */
  int length; /* 音データの長さ */
  double *s; /* 音データ */
} MONO_PCM;
```

makeSinWave.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include "wave.h"

int main(int argc,char **argv){
  if(argc!=2){
    fprintf(stderr,"Usage: makeSinWave wav¥n");
    exit(1);
  }
  MONO_PCM pcm; // 音
  double A=0.3; // 振幅
  double f=500; // 周波数
  pcm.fs=8000;  // サンプリング周波数
  pcm.bits=16;  // サンプリングビット数
  pcm.length=16000; // 長さ
  pcm.s=(double*)malloc(pcm.length*sizeof(double));
  for(int i=0;i<pcm.length;i++){
    double x=(double)i/pcm.fs;  // x
    pcm.s[i]=A*sin(2*M_PI*f*x); // A*sin(2πfx)
  }
  mono_wave_write(&pcm,argv[1]); // 保存
  free(pcm.s);
}
```

音階の生成

- プログラムで音階を生成する
  - ドからドまでの8音階
  - それぞれの音を1秒

音階	周波数
ド	523Hz
レ	587Hz
ミ	659Hz
ファ	698Hz
ソ	783Hz
ラ	880Hz
シ	988Hz
ド	1047Hz

makeScale.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include "wave.h"

int main(int argc,char **argv){
  if(argc!=2){
    fprintf(stderr,"Usage: makeScale wav¥n");
    exit(1);
  }
  MONO_PCM pcm; // 音
  pcm.fs=8000;  // サンプリング周波数
  pcm.bits=16;  // サンプリングビット数
  pcm.length=64000; // 長さ（8音階で8秒）
  pcm.s=(double*)malloc(pcm.length*sizeof(double));
  double scale_f[]={ 523,587,659,698,783,880,988,1047 }; // 音階の周波数
  int i=0;
  double A=0.3; // 振幅
  for(int j=0;j<8;j++){ // 8音階回す
    double f=scale_f[j]; // 音階jの周波数
    for(int k=0;k<8000;k++){ // 1つの音階で8000回（1秒）
      double x=(double)i/pcm.fs;  // x
      pcm.s[i++]=A*sin(2*M_PI*f*x); // A*sin(2πfx)
    }
  }
  mono_wave_write(&pcm,argv[1]); // 保存
  free(pcm.s);
}
```

課題5

1. ノコギリ波を生成するプログラムmakeSawWave.cを作成せよ
   - ノコギリ波：$N = S(f, A) + S\left(2f, \frac{A}{2}\right) + S\left(3f, \frac{A}{3}\right) + S\left(4f, \frac{A}{4}\right) + \cdots$
   - パラメータ
     - 周波数500Hz
     - 振幅0.3
     - サンプリング周波数8000Hz
     - 系列長16000（2秒）
     - 倍音は10倍まで
   - ヒント
     - 2重forループ構造になる
     - 内側のループで倍音の足し合わせを行う
     - pcm.s[i]の初期化を忘れないこと
2. ノコギリ波を再生し、エクセルで作成した音と比較せよ
3. サンプリング周波数を800Hz、8000Hz、44100Hzに変えて2秒の音を作成し、それらを聞き比べてみよ
   - 音がどのように変化するか？
   - 同じ振幅と周波数なのに音が違う理由を考察せよ

第1回 終了