

1. 丸め誤差

全ての数値は「コンピュータで扱える数値」に近似される。

例 1 $e^{\pi\sqrt{163}}$ は、本当は無理数

262537412640768743.999999999999250072597198185688879...

なのだが、十分な精度がないと

262537412640768744

という整数値かの如く出力される。

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# expisqrt163.py
from decimal import *
for p in range(10, 61, 5):
    getcontext().prec = p
    pi = Decimal('3.141592653589793238462643383279502884197169399(以下略)')
    x = Decimal('163')
    y = (pi * x.sqrt()).exp()
    print u' 精度 =', p, ":",
    print y
```

```
精度 = 10 : 2.625374097E+17
精度 = 15 : 2.62537412640764E+17
精度 = 20 : 262537412640768744.17
精度 = 25 : 262537412640768743.9999990
精度 = 30 : 262537412640768744.000000000024
精度 = 35 : 262537412640768743.9999999999924980
精度 = 40 : 262537412640768743.999999999992500725944
精度 = 45 : 262537412640768743.99999999999250072597198209
精度 = 50 : 262537412640768743.9999999999925007259719818568865
精度 = 55 : 262537412640768743.999999999992500725971981856888793537
精度 = 60 : 262537412640768743.99999999999250072597198185688879353856337
```

2. オーバーフロー・アンダーフロー

大き過ぎる数は仕様の限界を超えて overflow のエラーを起こす。小さ過ぎる数は正しく表現できなかったり 0 になってしまったりする。

例 2 $2 \times 2 \times \dots = ?$

```
/* error_overflow1.c */
#include<stdio.h>
int main()
{
    int i, x = 1;
    for(i = 1; i <= 35; i++){
        x *= 2;
        printf("2^%2d = %d\n", i, x);
    }
}
```

(中略)
 $2^{29} = 536870912$
 $2^{30} = 1073741824$
 $2^{31} = -2147483648$
 $2^{32} = 0$
 $2^{33} = 0$

例3 $3 \times 3 \times \dots = ?$

```
/* error_overflow2.c */
#include<stdio.h>
int main()
{
    int i, x = 1;
    for(i = 1; i <= 30; i++){
        x *= 3;
        printf("3^%2d = %d\n", i, x);
    }
}
```

(中略)
 $3^{18} = 387420489$
 $3^{19} = 1162261467$
 $3^{20} = -808182895$
 $3^{21} = 1870418611$
 $3^{22} = 1316288537$
 $3^{23} = -346101685$
 $3^{24} = -1038305055$

例4 $((2^2)^2)^2 \dots = ?$

```
/* error_overflow3.c */
#include<stdio.h>
int main()
{
    int i;
    double x = 2.0;
    printf("初期値 = %e\n", x);
    for(i = 1; i <= 10; i++){
        x = x * x;
        printf("その2乗 = %e\n", x);
    }
}
```

初期値 = 2.000000e+00
 その2乗 = 4.000000e+00
 (中略)
 その2乗 = 4.294967e+09
 その2乗 = 1.844674e+19
 その2乗 = 3.402824e+38
 その2乗 = 1.157921e+77
 その2乗 = 1.340781e+154
 その2乗 = inf

例5 $(1/10^n) \times 10^n = ?$

```
/* error_underflow.c */
#include<stdio.h>
int main()
{
    int i, n;
    float x;
    for(n = 35; n <= 50; n++){
        x = 1.0;
        for(i = 1; i <= n; i++) x /= 10;
        for(i = 1; i <= n; i++) x *= 10;
        printf("n = %d のとき %f\n", n, x);
    }
}
```

```
n = 38 のとき 1.000000
n = 39 のとき 1.000000
n = 40 のとき 0.999995
n = 41 のとき 0.999967
n = 42 のとき 1.000527
n = 43 のとき 0.994922
n = 44 のとき 0.980909
n = 45 のとき 1.401299
n = 46 のとき 0.000000
n = 47 のとき 0.000000
```

3. 累積誤差

塵も積もれば山となる。

例6 $\frac{1}{n}$ を n 個足すと 1 のはずだが ...

```
/* error_accumulation.c */
#include<stdio.h>
int main()
{
    int i, n = 100;
    float x, sum;
    while(n <= 10000000){
        x = 1.0 / n;
        sum = 0.0;
        for(i = 1; i <= n; i++) sum += x;
        printf("n = %8d のとき 1/n + 1/n + ... = %7.5f\n", n, sum);
        n *= 10;
    }
}
```

```
n =      100 のとき 1/n + 1/n + ... = 1.00000
n =     1000 のとき 1/n + 1/n + ... = 0.99999
n =    10000 のとき 1/n + 1/n + ... = 1.00005
n =   100000 のとき 1/n + 1/n + ... = 1.00099
n =  1000000 のとき 1/n + 1/n + ... = 1.00904
n = 10000000 のとき 1/n + 1/n + ... = 1.06477
```

4. 積み残し

$|a| \gg |b|$ のときに $a + b$ を計算すると b の下の方の桁が無視される。

例 7 $\frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \dots$ の理論値は $\frac{\pi^2}{6} = 1.6449340668\dots$ だが ...

```
/* error_zeta2.c */
#include<stdio.h>
#include<math.h>
#define pi 3.14159265358979324
int main()
{
    int i, j, n;
    float x;
    printf("理論値は %f だが\n\n", pi * pi / 6);
    printf("昇順に加えると\n");
    for(j = 2; j <= 7; j++){
        n = (int)pow(10, j);
        x = 0.0;
        for(i = 1; i <= n; i++) x += 1.0 / i / i;
        printf("%8d 項目までの和 = %f\n", n, x);
    }
    printf("\n");
    printf("降順に加えるとましで\n");
    for(j = 2; j <= 7; j++){
        n = (int)pow(10, j);
        x = 0.0;
        for(i = n; i >= 1; i--) x += 1. / i / i;
        printf("%8d 項目までの和 = %f\n", n, x);
    }
}
```

理論値は 1.644934 だが

昇順に加えると

```
100 項目までの和 = 1.634984
1000 項目までの和 = 1.643935
10000 項目までの和 = 1.644725
100000 項目までの和 = 1.644725
1000000 項目までの和 = 1.644725
10000000 項目までの和 = 1.644725
```

降順に加えるとましで

```
100 項目までの和 = 1.634984
1000 項目までの和 = 1.643934
10000 項目までの和 = 1.644834
100000 項目までの和 = 1.644924
1000000 項目までの和 = 1.644933
10000000 項目までの和 = 1.644934
```

例 8 $\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots = +\infty$ だが ...

```
/* error_zeta1.c */
#include<stdio.h>
int main()
{
    int c = 0, i = 0;
    float x = 0.0, y = -1.0;
    while(x != y){
        i++; c++;
        y = x;
        x += 1.0 / i;
        if(c == 100000){
            printf("1/1 + 1/2 + ... + 1/%7d = %9.6f\n", i, x);
            c = 0;
        }
    }
    printf("ここから先は和の値が増えなくなりました:\n", i);
    printf("1/1 + 1/2 + ... + 1/%7d = %9.6f\n", i, x);
}
```

1/1 + 1/2 + ... + 1/ 100000 = 12.090851

1/1 + 1/2 + ... + 1/ 200000 = 12.782757

1/1 + 1/2 + ... + 1/ 300000 = 13.195325

(中略)

1/1 + 1/2 + ... + 1/1800000 = 15.120297

1/1 + 1/2 + ... + 1/1900000 = 15.215665

1/1 + 1/2 + ... + 1/2000000 = 15.311032

ここから先は和の値が増えなくなりました:

1/1 + 1/2 + ... + 1/2097152 = 15.403683

5. 桁落ち

$a - b$ のときに $a - b$ を計算すると著しく精度が落ちる。

例 9 $\left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}\right) \times n \times (n+1) = 1$ のはずが ...

```
/* error_cancellation1.c */
#include<stdio.h>
int main()
{
    int n, i;
    float x, y, z, w;
    n = 10;
    for(i = 0; i < 8; i++){
        x = 1.0 / n;
        y = 1.0 / (n + 1);
        z = x - y;
        w = z * (n * (n + 1.0));
        printf("n = %9d のとき [1/n-1/(n+1)]*(n*(n+1)) = %f\n", n, w);
        n *= 10;
    }
}
```

```
n =      10 のとき [1/n-1/(n+1)]*(n*(n+1)) = 1.000000
n =     100 のとき [1/n-1/(n+1)]*(n*(n+1)) = 0.999999
n =    1000 のとき [1/n-1/(n+1)]*(n*(n+1)) = 1.000075
n =   10000 のとき [1/n-1/(n+1)]*(n*(n+1)) = 0.999817
n =  100000 のとき [1/n-1/(n+1)]*(n*(n+1)) = 1.000454
n = 1000000 のとき [1/n-1/(n+1)]*(n*(n+1)) = 1.023183
n = 10000000 のとき [1/n-1/(n+1)]*(n*(n+1)) = 1.421086
n = 100000000 のとき [1/n-1/(n+1)]*(n*(n+1)) = 0.000000
```

6. おまけその 1 : どこがバグかな?

$\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots$ の計算をしているはずなのに ...

```
/* error_zeta1_bugged.c */
#include<stdio.h>
int main()
{
    int n;
    float x = 0.0;
    for(n = 1; n < 11; n++){
        x += 1 / n;
        if(n == 1) printf("1/1                = %9.6f\n", x);
        if(n == 2) printf("1/1 + 1/2          = %9.6f\n", x);
        if(n == 3) printf("1/1 + 1/2 + 1/3      = %9.6f\n", x);
        if(n > 3) printf("1/1 + 1/2 + ... + 1/%2d = %9.6f\n", n, x);
    }
}
```

```
1/1                = 1.000000
1/1 + 1/2          = 1.000000
1/1 + 1/2 + 1/3    = 1.000000
1/1 + 1/2 + ... + 1/ 4 = 1.000000
1/1 + 1/2 + ... + 1/ 5 = 1.000000
1/1 + 1/2 + ... + 1/ 6 = 1.000000
1/1 + 1/2 + ... + 1/ 7 = 1.000000
1/1 + 1/2 + ... + 1/ 8 = 1.000000
1/1 + 1/2 + ... + 1/ 9 = 1.000000
1/1 + 1/2 + ... + 1/10 = 1.000000
```

7. おまけその 2 : おもしろい配列の仕様

```
/* array.c
おもしろい配列の仕様
理由は a[i] = *(a+i) = *(i+a) = i[a] だからなんだけど、わかるかな?
*/
#include<stdio.h>
main()
{
    int  a[] = {1,4,2,8,5,7}, i;
    char b[] = "Kochi";

    for(i = 0; i < 6; i++) printf("%d[a] = %d, ", i, i[a]);
    printf("\n");
    for(i = 0; i < 5; i++) printf("%d[b] = %c, ", i, i[b]);
}
```

```
0[a] = 1,  1[a] = 4,  2[a] = 2,  3[a] = 8,  4[a] = 5,  5[a] = 7,
0[b] = K,  1[b] = o,  2[b] = c,  3[b] = h,  4[b] = i,
```