

C, C++ で複素数

桂田 祐史

2010年9月7日, 2018年6月19日

<http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/labo/text/complex-c/>

C言語に複素数が導入されたのは、(Cの結構長い歴史からすれば) 比較的最近のことで使い方も浸透していないし、さらにそれが省いても良いことになったりして(まあ、GCCやLLVMでは使い続けられそうな気がするけれど)、率直に言ってC言語で複素数を使うのはあまりお勧めではない。

でも、これまで学生が僕のところに持ち込んで来るプログラムは大抵Cだったりする(笑)。まあ、C++習っていないから仕方ないか。

ベクトル・行列とか複素数とか、色々考えると、CよりはC++とか、Fortranとか、MATLABとかを使う方が良い気がする。そうそう、Pythonでも良いだろうし。

1 参考にした情報源

(久しぶりに見たら、今でも残っていて感心)

プログラミング言語Cの新機能¹

Status of C99 features in GCC²

C approved standards (承認された規格)³

もともと、C11では、複素数の機能は省いて良い機能になったそう。GCCやLLVMではサポートが続くようだけど…

2 Cで複素数

導入されたのが、C++よりも後だったので、「C++はCの上位互換」というのが崩れてしまったのが悲しい。

2.1 complex.h を使わずにやる場合

変数の宣言は、次のように行う。

```
float _Complex a;
double _Complex b;
long double _Complex c;
```

変数 a の実部、虚部はそれぞれ `__real__ a`, `__imag__ a` で得られる。

¹<http://seclan.d11.jp/c99d/>

²<http://gcc.gnu.org/c99status.html>

³<http://www.open-std.org/JTC1/SC22/WG14/www/standards>

```

/*
 * test-without-complex.h.c
 *  __real__, __imag__ 演算子
 *  符号を必ず表示させる %+f という書式
 */

#include <stdio.h>

int main(void)
{
    double _Complex a,b,c;

    a = 1+2i;

    printf("input Re b and Im b:");
    scanf("%lf%lf", &__real__ b, &__imag__ b);

    c = a + b;
    printf("%f%+fi\n", __real__ c, __imag__ c);
    return 0;
}

```

GCC には、虚数単位を表す `_Complex_I` がないが (直るの?直ったの?)、

```
#define _Complex_I (1.0iF)
```

のように自分で定義すれば良い。

2.2 complex.h を使ってやる場合

変数の宣言は、次のように行う。

```

float complex a;
double complex b;
long double complex c;

```

実部、虚部を求める関数として、

単精度	<code>crealf()</code> , <code>cimagf()</code>
倍精度	<code>creal()</code> , <code>cimag()</code>
長倍精度	<code>creall()</code> , <code>cimagl()</code>

がある。その他に絶対値 `cabs()`、共役複素数 `conj()`、偏角 `carg()`、それからもちろん (?) `cexp()`、`csin()` などの関数が用意されている。

(システム標準のコンパイラならば、`complex.h` のパス名は `/usr/include/complex.h` であろうから、一度どういうものがあるか読んでみると良い。)

虚数単位は `I` という名前で見える。`i` は他で使われるだろうから大文字ということらしい。もし `j` が使いたければ

```

#undef I
#define j _Imaginary_I

```

としなさい、だとか。

```

/*
 * test-with-complex.h.c
 */

```

```
#include <stdio.h>
#include <complex.h>

int main(void)
{
    double complex a,b,c;
    double re_b, im_b;

    a = 1+2i;

    printf("input Re b and Im b:");
    scanf("%lf%lf", &re_b, &im_b);
    b = re_b + im_b * I;

    c = a + b;
    printf("%f%+fi\n", creal(c), cimag(c));
    return 0;
}
```

(某月某日) 某学生がはまった落とし穴。complex double 型の数値を double 型の数値に代入して、結果がおかしいと悩んでいた (代入の結果は、複素数値の実部になる。代入直後に結果を表示したりすれば気がついただろうが、計算の途中に紛れ込んでいたため、発見が遅れた。)。これくらいはコンパイラーが警告して欲しいような気がするが、もともと

```
int i;
double x;
...
i = x;
```

のように int 型変数に double 型の数値を代入できたりする (結果は原点に向かっての切り捨てになった — いつもこうなるかどうかは知らない) 言語仕様なので、そう思うのは筋違いなのかもしれない。注意しないと。

3 C++

std::complex というテンプレート・ライブラリがある。

```
#include <complex>
using namespace std; // これは好み
```

単精度	complex<float>
倍精度	complex<double>
?精度	complex<long double>

C の $a = 1+2i$; は、C++ では

```
a = complex<double>(1,2);
```

で実現出来る。変数定義と同時に値の設定をしたいのならば、

```
complex<double> a(1,2);
```

とするのも良い。

```

test-cpp-complex-1.cpp
/*
 * test-cpp-complex-1.cpp
 * g++ test-cpp-complex-1.cpp
 */

#include <iostream>
#include <iomanip> // setprecision()
#include <complex>
#include <math.h>

using namespace std;

int main(void)
{
    complex<double> I(0,1), z;
    cout << "i=" << I << endl;
    cout << "i^2=" << I * I << endl;
    cout << setprecision(16) << "sqrt(I)=" << sqrt(I) << endl;
    z=1.0+I;
    cout << "z=" << z << ", z^2=" << z*z << endl;
    return 0;
}

```

A C++プログラム例

A.1 古いC++プログラムの修正

昔作った C++ プログラム⁴を引っ張りだして来たら、コンパイルできない(苦笑)。C++ ってそういうプログラミング言語だと、2000年頃痛感したけれど、その頃作ったプログラムも今はコンパイルできない。Cではあり得ないことだけど、C++では、それが許される環境にあるので、新しい機能が取り込める、ということなのかな？

- 以前は

```

#include <iostream.h>
#include <complex.h>

```

のようにしていたものを

```

#include <iostream>
#include <complex>

```

と直す。

- 以前は `std` という namespace は指定する必要がなかったが、さぼれなくなった。`std::cin` のように一々 `std::` をつけるか、

```

using namespace std;

```

とする。

⁴「非線形方程式、特に代数方程式の数値解法」, <http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/lecture/ouyoukaiseki4/notebook/nonlinear-algebra.pdf> の中で代数方程式を解くプログラムを C++ で書いた。

- 式の中に `complex` と `int` を混在させると、必要に応じて `int` から `complex` に型上げしてくれていたが、それをしてくれなくなった。自分で型を直すのであれば、`2` は、`(double) 2` や `double(2)` のようにキャストするか、`2.0` とするか、あるいは `complex<double>(2,0)` のようにする。

自動的に処理することも出来て、例えば Michel and Stoitsov [1] の `hyp_2F1` の `complex_functions.H` では、それにオペレーター・オーバーロードで対応している。

complex_functions.H から引用

```
// Usual operator overloads of complex numbers with integers
// -----
// Recent complex libraries do not accept for example z+n or z==n with n integer, signed or unsigned
// The operator overload is done here, by simply putting a cast on double to the integer.
```

例えば

```
inline complex<double> operator + (const complex<double> &z, const int n)
{
    return (z+static_cast<double> (n));
}
```

のようなことをやっている (この手の関数定義を約 30 個)。

- C 由来の `exit()` を使うには `#include <cstdlib>` が必要。
- "DKGRAPH" のような文字列を表す式が、C++ では `string const` 型となっている。それを C で書いた `char` へのポインター型の引数を想定している関数に渡すと、コンパイル・エラーにはならないが、警告が出る。gcc では `-Wno-write-strings` で強制的に黙らせることが出来るけれど、プログラムの直し方を後述の `DK3.C` を例に説明する。直し方は二つある。(1) C プログラムの宣言の方を

```
extern void      g_init G_ARGS ((char * file_name, G_P_DIM win_width,
                                G_P_DIM win_height));
```

から

```
extern void      g_init G_ARGS ((const char * file_name, G_P_DIM win_width,
                                G_P_DIM win_height));
```

のように `const` をつける。(2) 呼び出す側で

```
g_init("DKGRAPH", 120.0, 120.0);
```

に

```
g_init((char *)"DKGRAPH", 120.0, 120.0);
```

のように (`const` 抜きの) `char *` へのキャストをつける。(2) はやっつけ仕事で、(1) の方が望ましいのかな、でも自分が作ったのではないライブラリを改変するのは副作用の発生が怖い (この例は GLSC のヘッダーファイル `glsc.h` を直して良いか、ということになるので悩ましい)。

A.2 quadratic-equation.C

```
// quadratic-equation.C --- 複素係数の 2 次方程式を解く。
//
//      g++ -o quadratic-equation quadratic-equation.C
//
//      注意: 素朴な (桁落ちの対策などしていない) アルゴリズムを使っている。
//
//      2016/3/22 修正
//      2000 年頃動いていたプログラムがコンパイル出来なかったので修正。
//      iostream.h, complex.h をインクルードしていた → .h を取る
//      namespace を指定していなかった (必要なかった) → using namespace std;
//      4, 2 などの int 型を使っていた → double 型にする

#include <iostream>
#include <complex>
using namespace std;

int main(void)
{
    complex<double> a, b, c, D, x1, x2;

    cout << "複素係数の 2 次方程式  $a x^2 + b x + c = 0$  ( $a \neq 0$ ) を解きます。" << endl;
    cout << " 複素数は ( ) でくくり、実部と虚部をカンマ , で区切って表す。"
        << endl;
    cout << " 例えば  $1 + 2i$  は (1,2) と表わします。" << endl;
    cout << "入力してください。" << endl;

    cout << "a="; cin >> a;
    cout << "b="; cin >> b;
    cout << "c="; cin >> c;

    cout << "a=" << a << ", b=" << b << ", c=" << c << endl;

    D = sqrt(b * b - 4.0 * a * c);
    x1 = (-b + D) / (2.0 * a);
    x2 = (-b - D) / (2.0 * a);
    cout << "x1=" << x1 << endl;
    cout << "x2=" << x2 << endl;

    return 0;
}
```

A.3 complex-newton.C

```
/*
 * complex-newton.C -- Newton 法で方程式  $f(x)=0$  を解く
 * コンパイル: g++ -o complex-newton complex-newton.C
 * 実行: ./complex-newton
 *
 * 2016/3/22 修正
 */

#include <iostream>
#include <complex>
using namespace std;

int main(void)
{
    int i, maxitr = 100;
    complex<double> f(complex<double>), dfdz(complex<double>), x, dx;
    double eps;
```

```

cout << " 初期値 x0, 許容精度 ε=";
cin >> x >> eps;

cout.precision(16);
for (i = 0; i < maxitr; i++) {
    dx = - f(x) / dfdz(x);
    x += dx;
    cout << "f(" << x << ")=" << f(x) << endl;
    if (abs(dx) <= eps) break;
}
return 0;
}

/*
 * この関数の例は杉原・室田『数値計算法の数理』岩波書店, p.67 による
 *  $f(z) = z^3 - 2z + 2$ 
 * 1 実根 ( $\approx -1.769292354238631$ ), 2 虚根 ( $\approx 0.8846461771193157 \pm 0.5897428050222054$ )
 * を持つが、原点の近くに初期値を取ると、0 と 1 の間を振動する。
 */

complex<double> f(complex<double> z)
{
    /* return z * z * z - 2 * z + 2; */
    return z * (z * z - 2.0) + 2.0;
}

/* 関数 f の導関数 (df/dx のつもりで名前をつけた) */
complex<double> dfdz(complex<double> z)
{
    return 3.0 * z * z - complex<double>(2,0);
}

```

A.4 DK3.C

(拙いところがあつて、今見ると直したいのだけど…あくまでも C++ で複素数を扱うにはどうするかサンプルと考えれば、まあいいかと。)

```

// DK3.C -- DKA 法で代数方程式の根を求める
//
// 数学科 6701 号室のワークステーション環境でのコンパイル
// (グラフィックス・ライブラリ GLSC を使っているので
// 情報科学センターではコンパイルできない。悪しからず。)
// g++ -o DK3 DK3.C -I/usr/local/include -lglscd -lX11 -lsocket
// あるいは
// ccmg+ DK3.C
//
// Win32 環境下の glscwin でも (若干の修正の下に) 動作させられることが
// 分かったので、画面に表示するメッセージを変更しました (2000/10/18)。
//
// 2016/3/22 修正
// (1) #include するのは .h なし
// (2) using namespace std;
// (3) #include <cstdlib> // exit() のため
// (4) int 型の n を (double)n とキャスト
// (5) "DKGRAPH" を (char *)"DKGRAPH" (string は char * と違うのだそう)
// g++ -I /usr/X11/include DK3.C -L/usr/local/lib -lglscd -L/usr/X11/lib -lX11
//
// 2016/12/30 修正
// extern { ... }; 最後の ; を忘れていたのを修正。

```

```

#include <iostream>
#include <iomanip> // setprecision() のため
// #include <math>
#include <complex> // complex<double> のため
#include <cstdlib> // std::exit() のため
using namespace std;

// GLSC のヘッダーファイルをインクルード
extern "C" {
#define G_DOUBLE
#include <glsc.h>
};

// プロトタイプ宣言
complex<double> polynomial(int, complex<double> *, complex<double>);
complex<double> bunbo(int, complex<double> *, int);

// 解きたい代数方程式の次数の最高値
#define MAXN 100

int main(void)
{
    int i, k, n;
    complex<double> a[MAXN+1], x[MAXN], newx[MAXN], dx[MAXN];
    complex<double> g, I(0,1);
    double r0, R, max, pi;

    // 数学定数 (円周率) の準備
    pi = 4 * atan(1.0);

    // 表示の桁数を 16 桁にする
    cout << setprecision(16);

    // 方程式の入力
    cout << "次数 n を入力してください (1 ≤ n ≤ " << MAXN << "): ";
    cin >> n;
    if (n > MAXN || n <= 0) {
        cerr << "次数は " << MAXN << "以下の自然数として下さい。" << endl;
        exit(0);
    }
    for (i = 0; i <= n; i++) {
        cout << (n-i) << "次の係数を入力してください: ";
        cin >> a[i];
    }

    // 多項式を最高次の係数で割って monic にする
    cout << "monic にします。" << endl;
    for (i = 1; i <= n; i++)
        a[i] /= a[0];
    a[0] = 1;
    cout << "修正した係数" << endl;
    for (i = 0; i <= n; i++)
        cout << "a[" << i << "]= " << a[i] << endl;

    // Aberth の初期値を配置する円の決定
    g = - a[1] / (double)n;
    cout << "根の重心" << g << endl;
    max = 0;
    for (i = 1; i <= n; i++)
        if (abs(a[i]) > max)
            max = abs(a[i]);
    cout << "max|a_i|= " << max << endl;
}

```

```

r0 = abs(g) + 1 + max;
cout << "根は重心中心で、半径 r0=" << r0 << "の円盤内にある" << endl;

cout << "円の半径 (分からなければ上の値を指定してください): ";
R = r0;
cin >> r0;
if (r0 > R)
    R = r0;
cout << "図は根の重心を中心として半径 " << R
#ifdef __CYGWIN__
    << "の円が表示できるようにします。" << endl;
#else
    << "の円が表示できるようにします。" << endl;
#endif

// Aberth の初期値
cout << "初期値" << endl;
for (i = 0; i < n; i++) {
    double theta;
    theta = 2 * i * pi / n + pi / (2 * n);
    x[i] = g + r0 * exp(I * theta);
    cout << x[i] << endl;
}

// グラフィックス・ライブラリ GLSC の初期化
g_init((char *)"DKGRAPH", 120.0, 120.0);
g_device(G_BOTH);
// 座標系の指定
g_def_scale(0,
    real(g) - 1.1 * R, real(g) + 1.1 * R,
    imag(g) - 1.1 * R, imag(g) + 1.1 * R,
    10.0, 10.0, 100.0, 100.0);
g_sel_scale(0);
// 線種、マーカーの指定
g_def_line(0, G_BLACK, 0, G_LINE_SOLID);
g_sel_line(0);
g_def_marker(0, G_RED, 2, G_MARKER_CIRC);
g_sel_marker(0);

// 初期値と初期値を置く円を描く
g_circle(real(g), imag(g), r0, G_YES, G_NO);
for (i = 0; i < n; i++)
    g_marker(real(x[i]), imag(x[i]));

// 反復
for (k = 1; k <= 1000; k++) {
    double error;
    cout << "第" << k << "反復" << endl;
    for (i = 0; i < n; i++) {
        dx[i] = polynomial(n, a, x[i]) / bunbo(n, x, i);
        newx[i] = x[i] - dx[i];
        // 図示する
        g_move(real(x[i]), imag(x[i]));
        g_plot(real(newx[i]), imag(newx[i]));
        g_marker(real(newx[i]), imag(newx[i]));
    }
    // 更新
    for (i = 0; i < n; i++) {
        x[i] = newx[i];
        cout << x[i] << endl;
    }
    // 変化量を計算する (ここは非常に素朴)
    error = 0.0;
}

```

```

    for (i = 0; i < n; i++)
        error += abs(dx[i]);
    cout << "変化量=" << error << endl;
    // 変化量が小さければ収束したと判断して反復を終了する。
    if (error < 1e-12)
        break;
}

// GLSC 終了の処理
cout << "終了には" << endl;
cout << " グラフィックスのウィンドウをクリック (X の場合)。" << endl;
cout << " グラフィックスのウィンドウをクローズ (Windows の場合)。" << endl;
g_sleep(-1.0);
g_term();

return 0;
}

// 多項式の値の計算 (Horner 法)
complex<double> polynomial(int n,
    complex<double> *a,
    complex<double> z)
{
    int i;
    complex<double> w;
    w = a[0];
    for (i = 1; i <= n; i++)
        w = (w * z + a[i]);
    return w;
}

//  $\prod (z_i - z_j)$  の計算
//  $j \neq i$ 
complex<double> bunbo(int n,
    complex<double> *z,
    int i)
{
    int j;
    complex<double> w(1,0);
    for (j = 0; j < n; j++)
        if (j != i)
            w *= (z[i] - z[j]);
    return w;
}

```

参考文献

- [1] Michel, N. and Stoitsov, M.: Fast computation of the Gauss hypergeometric function with all its parameters complex with application to the Pöschl–Teller–Ginocchio potential wave functions, *Computer Physics Communications*, Vol. 178, No. 7, pp. 535–551 (2008).