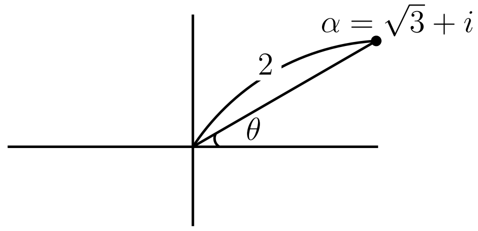
数学序論要綱 #8

3.3 複素数の極形式とオイラーの公式

ここでは，複素数に対する極形式，オイラーの公式を与え，複素数の積の幾何学的意味を考える。

まず例から始めよう。$\mathbb{C}$ と複素平面の同一視の下で，複素数 $\alpha = \sqrt{3}+i$ の表す平面内の点 α を考える。α と実軸の正の向きとがなす角を θ とし (今の場合 $\theta = \dfrac{\pi}{6}$)，$\sqrt{3}+i$ を α の絶対値と θ で表してみると次の図の様になる：



$$|\alpha| = \sqrt{\sqrt{3}^2 + 1^2} = 2, \quad \cos\frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \sin\frac{\pi}{6} = \frac{1}{2}$$

であるから，

$$\sqrt{3}+i = 2\cos\frac{\pi}{6} + 2i\sin\frac{\pi}{6} = 2\left(\cos\frac{\pi}{6} + i\sin\frac{\pi}{6}\right)$$

となる。

一般の場合を考えよう。複素数 $\alpha = a+bi$ に対して，ベクトル α と実軸の正の向きとが作る角を θ とおく。このとき，θ の範囲は，

$$0 \leqq \theta < 2\pi$$

の範囲で唯 1 つ定まる ($0 \leqq \theta < 2\pi$ という制限をつけなければ θ の選び方には $2k\pi$ $(k \in \mathbb{Z})$ だけの不定性があることに注意する)。ベクトル α の長さを r とすると

$$\cos\theta = \frac{a}{r}, \quad \sin\theta = \frac{b}{r} \iff a = r\cos\theta, \quad b = r\sin\theta$$

が成り立っている。 従って，

$$\boxed{\alpha = a + bi = r(\cos\theta + i\sin\theta)}$$

を得る。この複素数の長さ及び角度 θ を用いた表示を $\alpha = a + bi$ の**極形式**と呼び，θ を $\alpha = a + bi$ の**偏角**と呼ぶ。

演習問題 3.5　次の複素数の極形式を求めよ。

(1) $1 + i\sqrt{3}$　(2) -2　(3) i　(4) $2\sqrt{3} - 2i$　(5) $1 - \sqrt{3}i$

虚数 $i\theta$ を変数とする指数関数 $e^{i\theta}$ を，天下り的に次の式で定める：

$$\boxed{e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta}$$

これを**オイラーの公式**[1]と呼ぶ。この公式が何故成立するかに関しては解析学 I で学ぶが，ここでは天下りに成立するものとして議論を進める。

e^X において X が複雑な式になる場合もある。そのときは

$$\exp X = e^X$$

という表示をすることもある。例えば正規分布は

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$$

などと書かれる。

オイラーの公式において，θ を $-\theta$ に置き換え，$\cos(-\theta) = \cos\theta$, $\sin(-\theta) = -\sin\theta$ を用いると

$$e^{-i\theta} = \cos\theta - i\sin\theta$$

が得られることに注意する。

演習問題 3.6　次の問に答えよ。

(1) $e^{i\theta}$ は，原点を中心とする半径 1 の円上の点であることを示せ。
(2) オイラーの公式を用いて次の等式を導け。

$$\cos\theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \qquad \sin\theta = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i}$$

指数関数 $e^{i\theta}$ に対しても実数の指数関数 e^x と同様に指数法則が成り立つのか気になるが，次の定理が成り立つ：

[1] オイラーの公式と呼ばれるものは沢山あって，一般の場合「オイラーの公式」といってもどれを指すか不明確だが，数学序論および解析学 I,II ではこの公式を指すものと約束する。

定理 3.4 虚数 $i\theta$ を変数とする指数関数 $e^{i\theta}$ に対して指数法則が成り立つ：

$$e^{i\theta_1}e^{i\theta_2} = e^{i(\theta_1+\theta_2)}$$

証明　オイラーの公式 $e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$ と三角関数の加法定理より，

$$\begin{aligned}
e^{i\theta_1}e^{i\theta_2} &= (\cos\theta_1 + i\sin\theta_1)(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2) \\
&= (\cos\theta_1\cdot\cos\theta_2 - \sin\theta_1\cdot\sin\theta_2) + i(\sin\theta_1\cdot\cos\theta_2 + \cos\theta_1\cdot\sin\theta_2) \\
&= \cos(\theta_1+\theta_2) + i\sin(\theta_1+\theta_2) \\
&= e^{i(\theta_1+\theta_2)}
\end{aligned}$$

となり指数法則が成立している。 ∎

注意 3.5 [**指数法則＝加法定理**] この定理の逆，すなわち，指数関数 $e^{i\theta}$ の指数法則を仮定することにより，三角関数の加法定理が証明できる。 実際，オイラーの公式より

$$\begin{aligned}
e^{i\theta_1}e^{i\theta_2} &= (\cos\theta_1 + i\sin\theta_1)(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2) \\
&= (\cos\theta_1\cdot\cos\theta_2 - \sin\theta_1\cdot\sin\theta_2) + i(\sin\theta_1\cdot\cos\theta_2 + \cos\theta_1\cdot\sin\theta_2)
\end{aligned}$$

であり一方，

$$e^{i(\theta_1+\theta_2)} = \cos(\theta_1+\theta_2) + i\sin(\theta_1+\theta_2)$$

なので，指数関数 $e^{i\theta}$ の指数法則 ($e^{i\theta_1}e^{i\theta_2} = e^{i(\theta_1+\theta_2)}$) より三角関数の加法定理を得る。

さらに，定理 3.4 から次の系を得る：

系 3.6 [**ド・ モアブルの公式**] 自然数 n に対して，

$$(e^{i\theta})^n = e^{in\theta}, \qquad (\cos\theta + i\sin\theta)^n = \cos(n\theta) + i\sin(n\theta)$$

が成り立つ。

証明　定理 3.4 において，$\theta_1 = \theta_2 = \theta$ とおけば，$(e^{i\theta})^2 = e^{i(\theta+\theta)} = e^{i2\theta}$ が成り立つ。さらに定理 3.4 を適用すれば，

$$(e^{i\theta})^3 = (e^{i\theta})^2\cdot e^{i\theta} = e^{i2\theta}e^{i\theta} = e^{i3\theta}$$

を得る。以下，同様にして任意の自然数 n に対して，$(e^{i\theta})^n = e^{in\theta}$ が成り立つことが分かる (きちんと示すには数学的帰納法を用いる。演習問題 3.7 参照)。 ∎

演習問題 3.7　次の問いに答えよ。
(1) $(e^{i\theta})^{-1} = e^{-i\theta}$ を示せ。
(2) 系 3.6 を証明せよ。

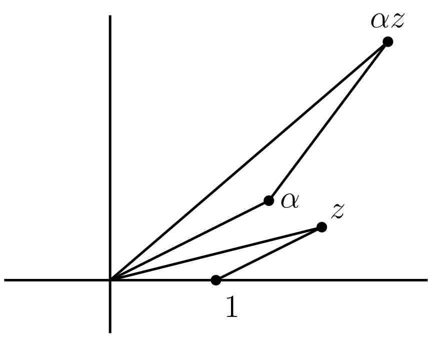


図 3.3

複素数の極形式の話に戻ろう。複素数 $\alpha = a + ib$ の絶対値を r，偏角を θ とする。オイラーの公式を用いると極形式は，次の様に書き直せる：

$$\alpha = a + ib = re^{i\theta}$$

これもまた複素数 α の**極形式**と呼ぶ。ここで，

$$r = \sqrt{a^2 + b^2} = |\alpha| \qquad \cos\theta = \frac{a}{r} \qquad \sin\theta = \frac{b}{r}$$

であった。この極形式を用いて，複素数の積の幾何学的意味を理解しよう。

$$\alpha = r_0 e^{i\lambda}, \qquad z = re^{i\theta}$$

とおく。

複素数をベクトルと見なすと，ベクトル α は長さが r_0 で実軸の正の向きとの成す角が λ のベクトル，z は長さが r で実軸の正の向きとの成す角が θ であるベクトルである。このとき，複素数としての積は，

$$\alpha z = r_0 e^{i\lambda} re^{i\theta} = r_0 re^{i(\lambda+\theta)}$$

であるから，ベクトル z は，複素数 α を掛けることにより，長さが r_0 倍，実軸の正の向きから λ だけ回転されたベクトル αz に変換された。これが複素数の積の幾何学的意味である。とくに，$r_0 = 1$ のとき，αz は z を λ だけ反時計回りに回転させたベクトルである。

特に $|\alpha| = r_0 = 1$ のとき αz は z を原点の回りに λ だけ回転させたベクトルになっている。$i = e^{i\pi/2}$ なので i をかけることは原点の回りに $\dfrac{\pi}{2}$ だけ回転させることになる。

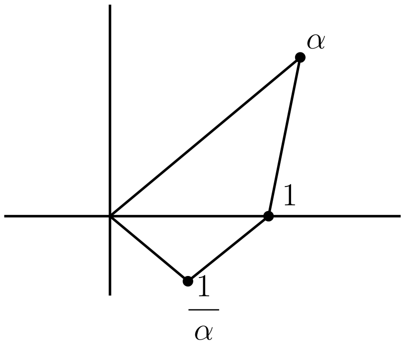


図 3.4

図 3.3 において $z = \dfrac{1}{\alpha}$ とおくと，$\alpha z = 1$ なので図 3.4 のようになる。即ち $\dfrac{1}{\alpha}$ の偏角は α の偏角の符号入れ替えたものであり，絶対値は逆数になっている。即ち

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{r_0}e^{-i\lambda}$$

となっている。α で割ることは $\dfrac{1}{\alpha}$ をかけることなので，z を α の偏角だけ時計回りに回転させ，α の絶対値で割ったものが商になる。

代数的には，

$$\frac{z}{\alpha} = \frac{re^{i\theta}}{r_0e^{i\lambda}} = \frac{r}{r_0}e^{i(\theta-\lambda)}$$

となっている。

注意 3.7 z や α の偏角が 0 から 2π の範囲に入っていても，αz や $\dfrac{z}{\alpha}$ の偏角が 0 から 2π の範囲に入っているとは限らない。

演習問題 3.8　次の点を極形式で表し図示せよ。なお (3)，(4) は点 α, β を用いて作図により与えよ。

(1) $\alpha = 2 + 2i$　　(2) $\beta = \dfrac{\sqrt{3}}{2} + \dfrac{i}{2}$

(3) $\alpha\beta$　　(4) $\dfrac{\beta}{\alpha}$

1 の n 乗根　任意の正の整数 n に対して，

$$z^n = 1$$

が成り立つとき，z を 1 の n **乗根**と呼ぶ。$|z|^n = 1$ 且つ $|z| > 0$ より，$|z| = 1$。すなわち，複素数 z は原点を中心とした半径 1 の円上の点である。そこで，$z = e^{i\theta}$ とおけば，ド・モアブルの公式より，

$$e^{in\theta} = 1.$$

従って，

$$n\theta = 2k\pi \quad (k \in \mathbb{Z})$$

を得る。これより，方程式 $z^n = 1$ の解は,

$$\begin{aligned}
\exp\left(\frac{2\pi i}{n}\right) &= \cos\frac{2\pi}{n} + i\sin\frac{2\pi}{n} \\
\exp\left(\frac{4\pi i}{n}\right) &= \cos\frac{4\pi}{n} + i\sin\frac{4\pi}{n} \\
&\cdots \\
\exp\left(\frac{2(n-1)\pi i}{n}\right) &= \cos\frac{2(n-1)\pi}{n} + i\sin\frac{2(n-1)\pi}{n} \\
\exp\left(\frac{2\pi n i}{n}\right) &= 1
\end{aligned}$$

の n 個である。

演習問題 3.9

(1) 1 の 4 乗根を具体的に求め，複素平面に図示せよ。

(2) 1 の 3 乗根を具体的に求め，複素平面に図示せよ。

(3) 1 の 6 乗根を具体的に求め，複素平面に図示せよ。

(4) 1 の 5 乗根を求め，複素平面に図示せよ。