複素数平面

以下，i は虚数単位を表すものとする。

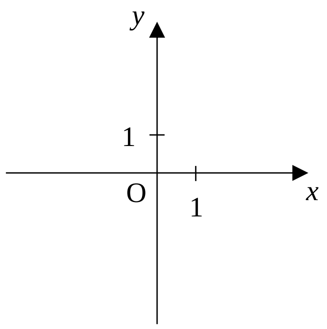
1　複素数平面

次の複素数を表す点を複素数平面上に図示せよ。

(1)　$2+3i$　　(2)　$-1+2i$　　(3)　$-3-i$

(4)　$2-2i$　　(5)　-2　　(6)　i

(7)　0

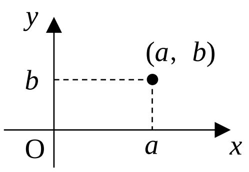


要　点

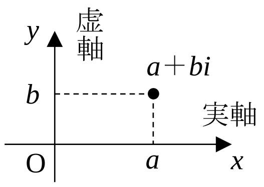
複素数平面

a，b を実数とする。複素数 $a+bi$ は，実部 a と虚部 b の組で定まるから，$a+bi$ に座標平面上の点 P(a，b)を対応させると，すべての複素数がこの平面上の点で表される。各点が複素数を表すと定められた座標平面を **複素数平面** といい，x 軸を **実軸** ，y 軸を **虚軸** という。

複素数 $z=a+bi$ を表す点 P を， **P(z)** または **P($a+bi$)** で表す。単に **点 z** または **点 $a+bi$** と表すこともある。

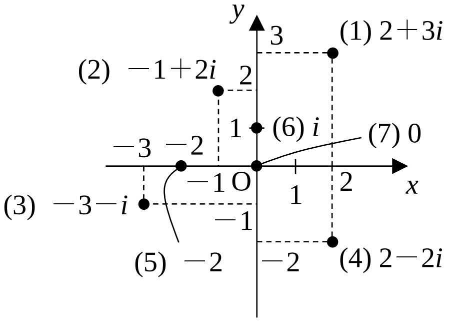


座標平面



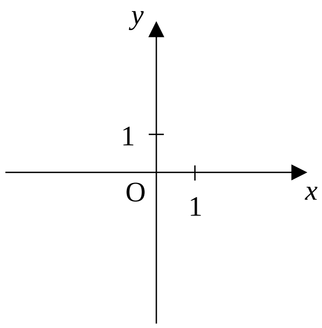
複素数平面

解答



2　**共役な複素数**

(1)　$z=1+2i$のとき，4 点z，$\bar{z}$，$-z$，$-\bar{z}$
を複素数平面上にそれぞれ図示せよ。



(2)　複素数 α，β について，次の問いに答えよ。

①　$\alpha-\beta=-2$ のとき，$\bar{\alpha}-\bar{\beta}$を求めよ。

②　$\alpha\beta=3i$のとき，$\bar{\alpha}\,\bar{\beta}$を求めよ。

要　点

a，b を実数とする。

複素数$z=a+bi$に対して，$\bar{z}=a-bi$をzの **共役な複素数** という。

共役な複素数の性質

複素数 $z=a+bi$ に対して

・**zが実数のとき，$b=0$であるから　$\bar{z}=z$**

zが純虚数のとき，$a=0$，$b\neq 0$であるから　$\bar{z}=-z$ かつ $z\neq 0$

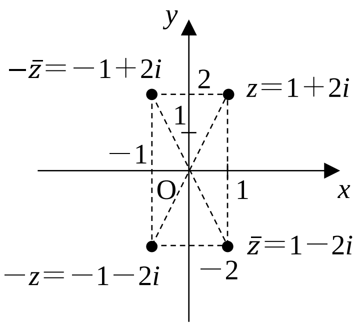
・z，w は複素数とする。

1　$\overline{z+w}=\bar{z}+\bar{w}$　　2　$\overline{z-w}=\bar{z}-\bar{w}$　　3　$\overline{zw}=\bar{z}\,\bar{w}$

4　$\overline{\left(\dfrac{z}{w}\right)}=\dfrac{\bar{z}}{\bar{w}}$　$(w\neq 0)$　　5　$\overline{(\bar{z})}=z$

解答

(1)



(2)　①　$\alpha-\beta$は実数であるから　$\overline{\alpha-\beta}=\alpha-\beta=-2$

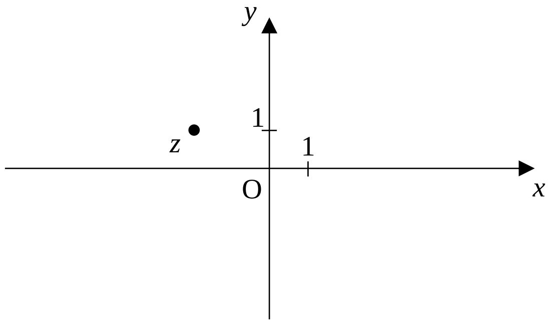
よって　$\bar{\alpha}-\bar{\beta}=\overline{\alpha-\beta}=\mathbf{-2}$

②　$\alpha\beta$は純虚数であるから　$\overline{\alpha\beta}=-\alpha\beta=-3i$

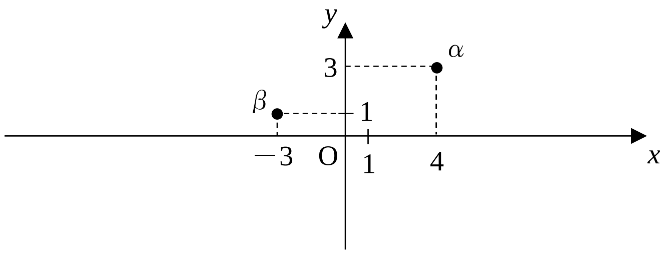
よって　$\bar{\alpha}\,\bar{\beta}=\overline{\alpha\beta}=\boldsymbol{-3i}$

$\boxed{3}$ 複素数の実数倍，加法，減法

(1)　$z=-2+i$ のとき，点 $2z$，$3z$，$-z$，$-2z$，$-3z$ を複素数平面上にそれぞれ図示せよ。



(2)　$\alpha=4+3i$，$\beta=-3+i$ のとき，点 $\alpha+\beta$，$\alpha-\beta$，$-\alpha+3\beta$ を複素数平面上にそれぞれ図示せよ。



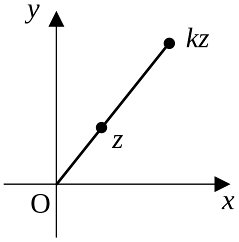
要　点

複素数の実数倍

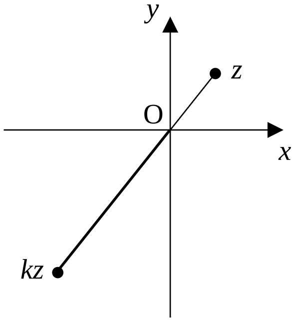
0 でない複素数 z と実数 k について，次のことが成り立つ。

・3 点 O(0)，z，kz は一直線上にある。

・<u>$k>0$ のとき</u>，点 kz は原点に関して点 z と同じ側にあり，原点からの距離は 0，z 間の距離の k 倍である。



・<u>$k<0$ のとき</u>，点 kz は原点に関して点 z と反対側にあり，原点からの距離は 0，z 間の距離の $|k|$ 倍である。

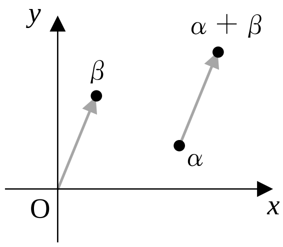


・<u>$k=0$ のとき</u>　$kz=0$

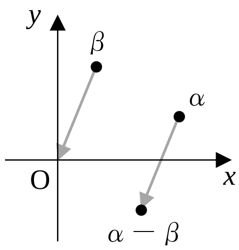
複素数の加法，減法

複素数α，βについて，次のことが成り立つ。

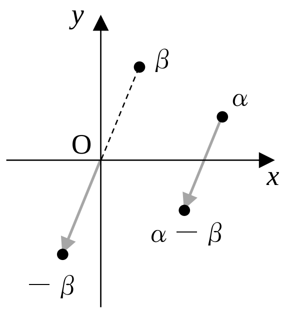
・点$\alpha+\beta$は，原点Oを点βに移す平行移動によって点αを移した点である。



・点$\alpha-\beta$は，点βを原点Oに移す平行移動によって点αを移した点である。

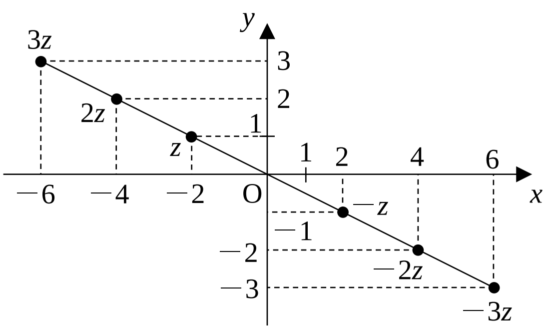


〈注意〉$-\beta=+(-\beta)$より，点βを原点Oに移す平行移動は，原点Oを点$-\beta$に移す平行移動と同じである。

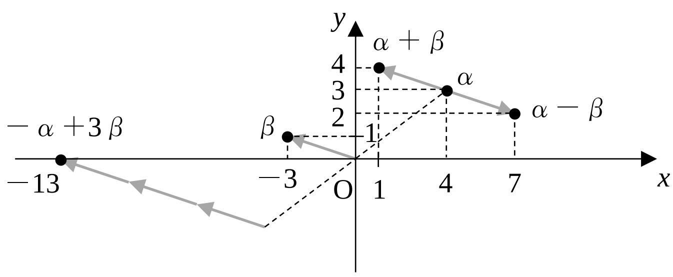


解答

(1)



(2)



$\boxed{4}$ **複素数の絶対値**

次の複素数の絶対値を求めよ。

(1)　$1+2i$　　(2)　$-3+4i$　　(3)　2　　(4)　$-i$

要　点

複素数の絶対値

a，bを実数とする。複素数$z=a+bi$に対し，$\sqrt{a^2+b^2}$ をzの **絶対値** といい，$|z|$ で表す。

すなわち　$|z|=|a+bi|=\sqrt{a^2+b^2}$

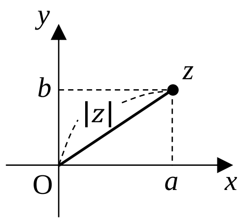
$|z|$は，原点Oから点zまでの距離である。

$|z|\geqq 0$であり，$|z|=0$となるのは$z=0$のときに限る。

〈注意〉$z=a+bi$のとき，$\bar{z}=a-bi$であり，

$z\bar{z}=(a+bi)(a-bi)=a^2-b^2i^2=a^2+b^2$より

$|z|^2=z\bar{z}$ が成り立つ。



解答

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

(3)　$|2|=\sqrt{2^2+0^2}=2$　　(4)　$|-i|=\sqrt{0^2+(-1)^2}=1$

$\boxed{5}$ **複素数の極形式**

次の複素数を極形式で表せ。ただし，偏角θは$0\leqq\theta<2\pi$とする。

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

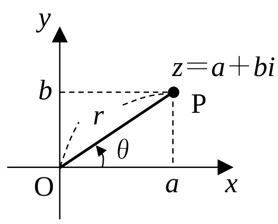
要　点

a，bを実数とする。0でない複素数$z=a+bi$を表す点をPとする。

半直線OPを動径と考えて，動径OPの表す角θをzの **偏角** といい，

arg *z* で表す。

〈注意〉記号argはargumentの略である。



OP$=r$とすると，rはzの絶対値であり，$a=r\cos\theta$，$b=r\sin\theta$となり，

$z=a+bi$は　$\boldsymbol{z=r(\cos\theta+i\sin\theta)}$　の形で表される。これを，複素数zの **極形式** という。

以上をまとめると，0でない複素数$z=a+bi$において

rはzの絶対値であるから　$r=\sqrt{a^2+b^2}$

θはzの偏角であるから　$\cos\theta=\dfrac{a}{r}$，$\sin\theta=\dfrac{b}{r}$を満たす角であり，

その極形式は　$\boldsymbol{z=r(\cos\theta+i\sin\theta)}$　と表される。

〈注意〉・0でない複素数zにおいて，zの絶対値は1通りに定まるが，偏角θはその1つをθ_0としたとき$\theta=\theta_0+2n\pi$（nは整数)も同じ位置にくるから1つに定まらない。$0\leqq\theta<2\pi$や$-\pi\leqq\theta<\pi$の範囲で偏角を考えるのが一般的である。

・$z=0$のときは偏角が定められないため，極形式は考えない。

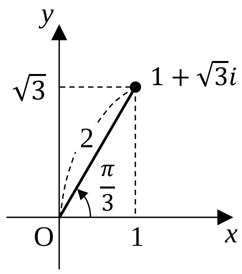
解答

(1)　$1+\sqrt{3}i$の絶対値は

$$\left|1+\sqrt{3}i\right|=\sqrt{1^2+\left(\sqrt{3}\right)^2}=2$$

偏角 θ は

$$\cos\theta=\frac{1}{2},\ \sin\theta=\frac{\sqrt{3}}{2}\text{ より}\quad \theta=\frac{\pi}{3}$$



よって　$1+\sqrt{3}i=\mathbf{2\left(\cos\frac{\pi}{3}+i\sin\frac{\pi}{3}\right)}$

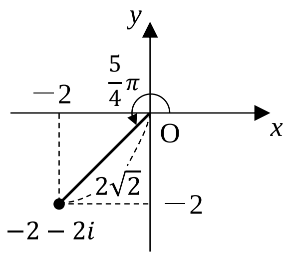
(2)　$-2-2i$ の絶対値は

$$|-2-2i|=\sqrt{(-2)^2+(-2)^2}=2\sqrt{2}$$

偏角 θ は

$$\cos\theta=\frac{-2}{2\sqrt{2}}=-\frac{1}{\sqrt{2}},\ \sin\theta=\frac{-2}{2\sqrt{2}}=-\frac{1}{\sqrt{2}}\text{ より}$$

$$\theta=\frac{5}{4}\pi$$



よって　$-2-2i=\mathbf{2\sqrt{2}\left(\cos\frac{5}{4}\pi+i\sin\frac{5}{4}\pi\right)}$

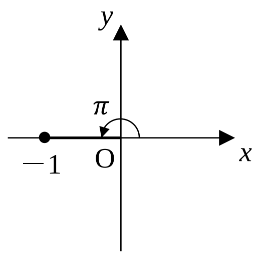
(3)　-1 の絶対値は

$$|-1|=\sqrt{(-1)^2+0^2}=1$$

偏角 θ は

$$\cos\theta=\frac{-1}{1}=-1,\ \sin\theta=\frac{0}{1}=0\text{ より}$$

$$\theta=\pi$$



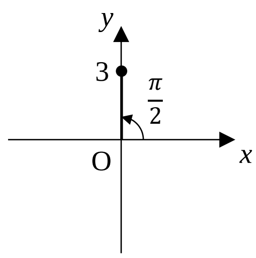
よって　$-1=\mathbf{\cos\pi+i\sin\pi}$

(4)　$3i$ の絶対値は

$$|3i|=\sqrt{0^2+3^2}=3$$

偏角 θ は

$$\cos\theta=\frac{0}{3}=0,\ \sin\theta=\frac{3}{3}=1\text{ より}\quad \theta=\frac{\pi}{2}$$



よって　$3i=\mathbf{3\left(\cos\frac{\pi}{2}+i\sin\frac{\pi}{2}\right)}$

6　複素数の乗法・除法

$\alpha=\sqrt{3}-i$，$\beta=-2+2i$のとき，$\alpha\beta$，$\dfrac{\alpha}{\beta}$をそれぞれ極形式で表せ。

ただし，偏角θは $0\leqq\theta<2\pi$とする。

要　点

0 でない 2 つの複素数を

$z_1 = r_1(\cos\theta_1 + i\sin\theta_1)$, $z_2 = r_2(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2)$

とするとき，積z_1z_2，商$\dfrac{z_1}{z_2}$は次のようになる。

・$z_1z_2 = r_1(\cos\theta_1 + i\sin\theta_1)\cdot r_2(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2)$

$= r_1r_2(\cos\theta_1\cos\theta_2 + i\sin\theta_2\cos\theta_1 + i\sin\theta_1\cos\theta_2 + i^2\sin\theta_1\sin\theta_2)$

$= r_1r_2\{(\cos\theta_1\cos\theta_2 - \sin\theta_1\sin\theta_2) + i(\sin\theta_1\cos\theta_2 + \cos\theta_1\sin\theta_2)\}$

三角関数の加法定理　$\cos(\alpha+\beta) = \cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta$

$\sin(\alpha+\beta) = \sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta$

を適用すると

$z_1z_2 = r_1r_2\{\cos(\theta_1+\theta_2) + i\sin(\theta_1+\theta_2)\}$

・$\dfrac{z_1}{z_2} = \dfrac{r_1(\cos\theta_1 + i\sin\theta_1)}{r_2(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2)} = \dfrac{r_1}{r_2}\cdot\dfrac{(\cos\theta_1 + i\sin\theta_1)(\cos\theta_2 - i\sin\theta_2)}{(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2)(\cos\theta_2 - i\sin\theta_2)}$

$$= \frac{r_1}{r_2}\cdot\frac{\cos\theta_1\cos\theta_2 - i\sin\theta_2\cos\theta_1 + i\sin\theta_1\cos\theta_2 - i^2\sin\theta_1\sin\theta_2}{\cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_2}$$

$$= \frac{r_1}{r_2}\cdot\frac{(\cos\theta_1\cos\theta_2 + \sin\theta_1\sin\theta_2) + i(\sin\theta_1\cos\theta_2 - \cos\theta_1\sin\theta_2)}{\cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_2}$$

三角関数の加法定理　$\cos(\alpha-\beta) = \cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta$

$\sin(\alpha-\beta) = \sin\alpha\cos\beta - \cos\alpha\sin\beta$

を適用すると

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2}\cdot\frac{\cos(\theta_1-\theta_2) + i\sin(\theta_1-\theta_2)}{1} = \frac{r_1}{r_2}\{\cos(\theta_1-\theta_2) + i\sin(\theta_1-\theta_2)\}$$

以上から，次のことが成り立つ。

0 でない 2 つの複素数 $z_1 = r_1(\cos\theta_1 + i\sin\theta_1)$, $z_2 = r_2(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2)$において

$\boxed{1}$ $\boldsymbol{z_1z_2 = r_1r_2\{\cos(\theta_1+\theta_2) + i\sin(\theta_1+\theta_2)\}}$

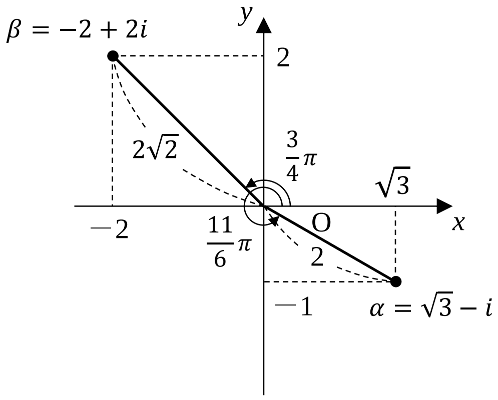
これから　$\boldsymbol{|z_1z_2| = |z_1||z_2|}$，　$\boldsymbol{\arg(z_1z_2) = \arg z_1 + \arg z_2}$

$\boxed{2}$ $\boldsymbol{\dfrac{z_1}{z_2} = \dfrac{r_1}{r_2}\{\cos(\theta_1-\theta_2) + i\sin(\theta_1-\theta_2)\}}$

これから　$\boldsymbol{\left|\dfrac{z_1}{z_2}\right| = \dfrac{|z_1|}{|z_2|}}$，　$\boldsymbol{\arg\dfrac{z_1}{z_2} = \arg z_1 - \arg z_2}$

解答

α，βの極形式は



$$\alpha=\sqrt{3}-i=2\left(\cos\frac{11}{6}\pi+i\sin\frac{11}{6}\pi\right)$$

$$\beta=-2+2i=2\sqrt{2}\left(\cos\frac{3}{4}\pi+i\sin\frac{3}{4}\pi\right)$$

であるから

$$\boldsymbol{\alpha\beta}=2\left(\cos\frac{11}{6}\pi+i\sin\frac{11}{6}\pi\right)\cdot2\sqrt{2}\left(\cos\frac{3}{4}\pi+i\sin\frac{3}{4}\pi\right)$$

$$=4\sqrt{2}\left\{\cos\left(\frac{11}{6}\pi+\frac{3}{4}\pi\right)+i\sin\left(\frac{11}{6}\pi+\frac{3}{4}\pi\right)\right\}$$

$$=4\sqrt{2}\left(\cos\frac{31}{12}\pi+i\sin\frac{31}{12}\pi\right)=\boldsymbol{4\sqrt{2}\left(\cos\frac{7}{12}\pi+i\sin\frac{7}{12}\pi\right)}$$

$$\boldsymbol{\frac{\alpha}{\beta}}=\frac{2\left(\cos\frac{11}{6}\pi+i\sin\frac{11}{6}\pi\right)}{2\sqrt{2}\left(\cos\frac{3}{4}\pi+i\sin\frac{3}{4}\pi\right)}=\frac{1}{\sqrt{2}}\left\{\cos\left(\frac{11}{6}\pi-\frac{3}{4}\pi\right)+i\sin\left(\frac{11}{6}\pi-\frac{3}{4}\pi\right)\right\}$$

$$=\boldsymbol{\frac{\sqrt{2}}{2}\left(\cos\frac{13}{12}\pi+i\sin\frac{13}{12}\pi\right)}$$

$\boxed{7}$ 複素数の積を表す点

2 つの複素数 $\alpha=1+i$，z について，点 αz は点 z をどのように移動した点か。

要　点

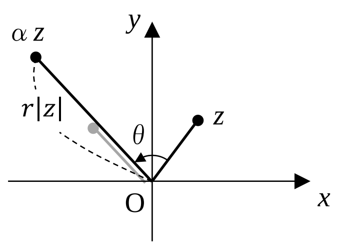
複素数 αz を表す点は，点 z を

原点 O のまわりに arg α だけ回転し，

原点からの距離を $|\alpha|$ 倍

した点である。

$\alpha=r(\cos\theta+i\sin\theta)$のとき



解答

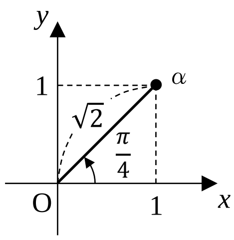
$\alpha=1+i=\sqrt{2}\left(\cos\frac{\pi}{4}+i\sin\frac{\pi}{4}\right)$

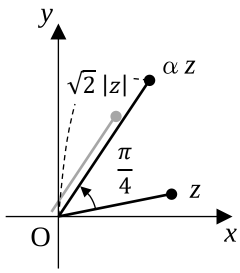
であるから，**点 αz は**

点 z を，原点Oのまわりに $\frac{\pi}{4}$ だけ

回転し，原点からの距離を $\sqrt{2}$ 倍

した点である。





8 **複素数の商を表す点**

2 つの複素数$\alpha=\sqrt{3}+i$，zについて，点$\dfrac{z}{\alpha}$は点zをどのように移動した点か。

要　点

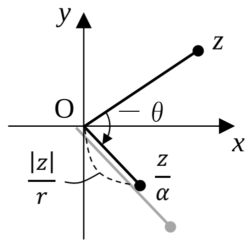
複素数$\dfrac{z}{\alpha}$を表す点は，点zを

原点 O のまわりに$-\arg\alpha$だけ回転し，

原点からの距離を$\dfrac{1}{|\alpha|}$倍

した点である。

$\alpha=r(\cos\theta+i\sin\theta)$のとき



解答

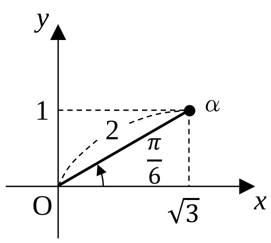
$\alpha=\sqrt{3}+i=2\left(\cos\dfrac{\pi}{6}+i\sin\dfrac{\pi}{6}\right)$

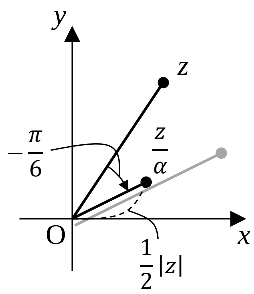
であるから，点$\dfrac{\boldsymbol{z}}{\boldsymbol{\alpha}}$は

点$\boldsymbol{z}$を，原点Oのまわりに$-\dfrac{\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{6}}$だけ

回転し，原点からの距離を$\dfrac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}$倍

した点である。





9 **複素数の *n* 乗の計算（ド・モアブルの定理の利用）**

次の計算をせよ。

(1)　$\left(\dfrac{1}{2}+\dfrac{\sqrt{3}}{2}i\right)^3$　　　(2)　$(1-i)^6$

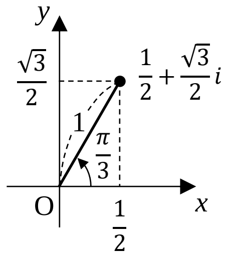
要　点

ド・モアブルの定理

n が整数のとき　$(\cos\theta+i\sin\theta)^n=\cos n\theta+i\sin n\theta$

解答

(1)　$\dfrac{1}{2}+\dfrac{\sqrt{3}}{2}i=\cos\dfrac{\pi}{3}+i\sin\dfrac{\pi}{3}$

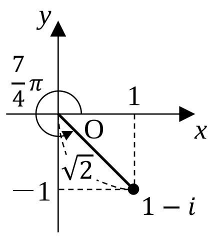


であるから，ド・モアブルの定理により

$$\left(\frac{1}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}i\right)^3=\left(\cos\frac{\pi}{3}+i\sin\frac{\pi}{3}\right)^3=\cos\left(3\cdot\frac{\pi}{3}\right)+i\sin\left(3\cdot\frac{\pi}{3}\right)$$

$$=\cos\pi+i\sin\pi=\mathbf{-1}$$

(2)　$1-i=\sqrt{2}\left(\cos\dfrac{7}{4}\pi+i\sin\dfrac{7}{4}\pi\right)$



であるから，ド・モアブルの定理により

$$(1-i)^6=\left\{\sqrt{2}\left(\cos\frac{7}{4}\pi+i\sin\frac{7}{4}\pi\right)\right\}^6$$

$$=\left(\sqrt{2}\right)^6\cdot\left(\cos\frac{7}{4}\pi+i\sin\frac{7}{4}\pi\right)^6=8\cdot\left\{\cos\left(6\cdot\frac{7}{4}\pi\right)+i\sin\left(6\cdot\frac{7}{4}\pi\right)\right\}$$

$$=8\left(\cos\frac{21}{2}\pi+i\sin\frac{21}{2}\pi\right)=8\left\{\cos\left(10\pi+\frac{1}{2}\pi\right)+i\sin\left(10\pi+\frac{1}{2}\pi\right)\right\}$$

$$=8\left(\cos\frac{1}{2}\pi+i\sin\frac{1}{2}\pi\right)=\boldsymbol{8i}$$

１０　方程式 $z^n=1$ の解

極形式を利用して，方程式 $z^3=1$ を解け。

要　点

解を $z=r(\cos\theta+i\sin\theta)$ とおき，ド・モアブルの定理 $\boldsymbol{(\cos\theta+i\sin\theta)^n=\cos n\theta+i\sin n\theta}$ を利用する。
右辺の 1 も極形式で表し， **絶対値** と **偏角** を両辺で比較して z を求める。
θ は $0\leqq\theta<2\pi$ の範囲で考えるとよい。

解答

$r>0$，$0\leqq\theta<2\pi$ として，$z=r(\cos\theta+i\sin\theta)$ とおくと，ド・モアブルの定理により

$z^3=r^3(\cos3\theta+i\sin3\theta)$　　また，1 の極形式は　$1=1(\cos0+i\sin0)$

よって　$r^3(\cos3\theta+i\sin3\theta)=1(\cos0+i\sin0)$

ここで，1 の偏角は $0+2k\pi$（k は整数）であるから，両辺の絶対値と偏角を比較すると

$r^3=1$，$3\theta=2k\pi$（k は整数）

$r>0$ であるから　$r=1$　　また　$\theta=\dfrac{2}{3}k\pi$　　$0\leqq\theta<2\pi$の範囲で考えると　$k=0,\ 1,\ 2$

したがって，$\theta=0,\ \dfrac{2}{3}\pi,\ \dfrac{4}{3}\pi$ であるから，求める解は

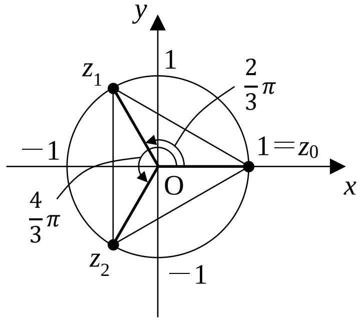
$z=\cos0+i\sin0$，$\cos\dfrac{2}{3}\pi+i\sin\dfrac{2}{3}\pi$，$\cos\dfrac{4}{3}\pi+i\sin\dfrac{4}{3}\pi$　　すなわち　$\boldsymbol{z=1,\ \dfrac{-1+\sqrt{3}i}{2},\ \dfrac{-1-\sqrt{3}i}{2}}$

コ ラ ム

方程式 $z^3=1$ の解

$$z=1,\ \frac{-1+\sqrt{3}i}{2},\ \frac{-1-\sqrt{3}i}{2}$$

を順に z_0，z_1，z_2 として，複素数平面上に図示すると右の図のようになる。



3 点 z_0，z_1，z_2 は単位円に内接する正三角形の頂点となっている。

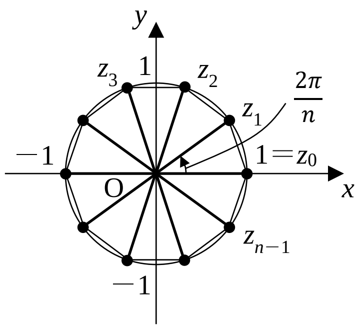
また，$z_1=\cos\frac{2}{3}\pi+i\sin\frac{2}{3}\pi$ であり

$$z_1{}^2=\left(\cos\frac{2}{3}\pi+i\sin\frac{2}{3}\pi\right)^2=\cos\left(2\cdot\frac{2}{3}\pi\right)+i\sin\left(2\cdot\frac{2}{3}\pi\right)$$

$$=\cos\frac{4}{3}\pi+i\sin\frac{4}{3}\pi=z_2$$

であるので，$z_2=z_1{}^2$ が成り立つ。

一般に，n が自然数のとき，$z^n=1$ を満たす複素数 z を **1 の n 乗根** という。複素数平面上に図示すると，点 1 を 1 つの頂点とする単位円に内接する正 n 角形の頂点となっている。



$$\boldsymbol{z=\cos\left(\frac{2\pi}{n}\times k\right)+i\sin\left(\frac{2\pi}{n}\times k\right)}$$

ただし　$k=0$，1，……，$n-1$

と表すことができ，$k=0$，1，……，$n-1$ のときの z を順に z_0，z_1，……，z_{n-1} とすると，　$\boldsymbol{z_k=z_1{}^k}$ が成り立つ。

$\boxed{１１}$　**方程式 $z^n=\alpha$ の解（複素数 α の n 乗根）**

方程式 $z^4=-1$ を解け。

要　点

（要点は，「$\boxed{１０}$　**方程式 $z^n=1$ の解**」とほぼ同じ。）

解を $z=r(\cos\theta+i\sin\theta)$ とおき，ド・モアブルの定理

$$(\cos\theta+i\sin\theta)^n=\cos n\theta+i\sin n\theta$$

を利用する。

右辺も極形式で表し，　**絶対値** と **偏角** を両辺で比較して z を求める。

θ は $0\leqq\theta<2\pi$ の範囲で考えるとよい。

解答

$r>0$，$0\leqq\theta<2\pi$ として，$z=r(\cos\theta+i\sin\theta)$ とおくと，ド・モアブルの定理により

$z^4=r^4(\cos4\theta+i\sin4\theta)$ 　　また，-1 の極形式は　$-1=1(\cos\pi+i\sin\pi)$

よって　$r^4(\cos4\theta+i\sin4\theta)=1(\cos\pi+i\sin\pi)$

ここで，-1 の偏角は $\pi+2k\pi$（k は整数）であるから，両辺の絶対値と偏角を比較すると

$r^4=1$，$4\theta=\pi+2k\pi$（k は整数）

$r>0$ であるから　$r=1$　　また　$\theta=\dfrac{\pi}{4}+\dfrac{k}{2}\pi$　　$0\leqq\theta<2\pi$の範囲で考えると　$k=0$，1，2，3

したがって，$\theta=\dfrac{\pi}{4}$，$\dfrac{3}{4}\pi$，$\dfrac{5}{4}\pi$，$\dfrac{7}{4}\pi$ であるから，求める解は

$$z=\cos\frac{\pi}{4}+i\sin\frac{\pi}{4},\quad \cos\frac{3}{4}\pi+i\sin\frac{3}{4}\pi,\quad \cos\frac{5}{4}\pi+i\sin\frac{5}{4}\pi,\quad \cos\frac{7}{4}\pi+i\sin\frac{7}{4}\pi$$

すなわち　$\boldsymbol{z=\dfrac{\sqrt{2}+\sqrt{2}i}{2},\ \dfrac{-\sqrt{2}+\sqrt{2}i}{2},\ \dfrac{-\sqrt{2}-\sqrt{2}i}{2},\ \dfrac{\sqrt{2}-\sqrt{2}i}{2}}$

１２　**線分の内分点・外分点，三角形の重心を表す複素数**

(1)　2 点 P$(-1+5i)$，Q$(5+2i)$を結ぶ線分 PQ を 1 : 2 に内分する点，外分する点を表す複素数を，それぞれ求めよ。また，線分 PQ の中点を表す複素数を求めよ。

(2)　3 点 A$(-1+5i)$，B$(5+2i)$，C$(2-4i)$を頂点とする△ABC の重心を表す複素数を求めよ。

要　点

線分の内分点，外分点

2 点 A(α)，B(β)を結ぶ線分 AB を$m:n$に　内分する点は　$\boldsymbol{\dfrac{n\alpha+m\beta}{m+n}}$，　外分する点は　$\boldsymbol{\dfrac{-n\alpha+m\beta}{m-n}}$

特に，線分 AB の中点は　$\boldsymbol{\dfrac{\alpha+\beta}{2}}$

三角形の重心

3 点 A(α)，B(β)，C(γ)を頂点とする △ABC の重心は　$\boldsymbol{\dfrac{\alpha+\beta+\gamma}{3}}$

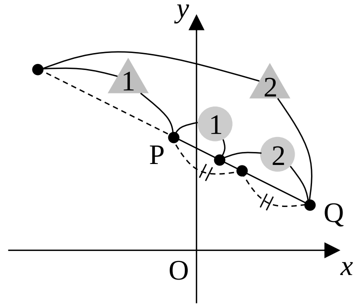
解答

(1)　線分 PQ を 1 : 2 に

内分する点は　$\dfrac{2(-1+5i)+1\cdot(5+2i)}{1+2}=\dfrac{3+12i}{3}=\boldsymbol{1+4i}$

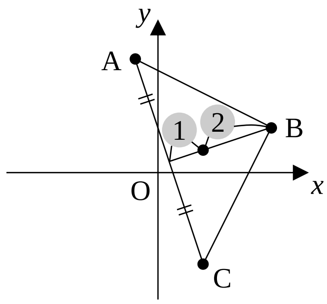
外分する点は　$\dfrac{-2(-1+5i)+1\cdot(5+2i)}{1-2}=\dfrac{7-8i}{-1}=\boldsymbol{-7+8i}$

線分 PQ の中点は　$\dfrac{(-1+5i)+(5+2i)}{2}=\boldsymbol{\dfrac{4+7i}{2}}$



(2)　求める重心は

$$\frac{(-1+5i)+(5+2i)+(2-4i)}{3}=\frac{6+3i}{3}=\boldsymbol{2+i}$$



１３　**2 点間の距離**

2 点 P(－1＋5i)，Q(5＋2i) 間の距離を求めよ。

要　点

複素数平面上の 2 点 α，β 間の距離は　$|\boldsymbol{\beta-\alpha}|$

〈注意〉a，bを実数とする。$z=a+bi$のとき　$|\boldsymbol{z}|=\sqrt{\boldsymbol{a^2+b^2}}$

解答

$|(5+2i)-(-1+5i)|=|6-3i|=\sqrt{6^2+(-3)^2}=\sqrt{45}=\boldsymbol{3\sqrt{5}}$

１４　**等式を満たす点のえがく図形(1)**　（垂直二等分線，円）

次の等式を満たす点 z のえがく図形を求めよ。

(1)　$|z-2|=|z+3i|$　　　　(2)　$|3z-4+5i|=6$

要　点

垂直二等分線

異なる 2 定点 A(α)，B(β)と動点 P(z)に対して

$|z-\alpha|=|z-\beta| \iff \mathrm{AP}=\mathrm{BP} \iff$ 点 P は 2 点 A，B から等距離にある

したがって，**等式 $|z-\alpha|=|z-\beta|$ を満たす点 z のえがく図形は，2 点 A(α)，B(β)を結ぶ線分 AB の垂直二等分線**である。

円

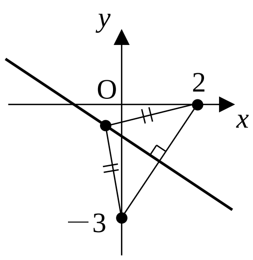
定点 A(α)と動点 P(z)，正の実数 r に対して

$|z-\alpha|=r \iff \mathrm{AP}=r \iff$ 点 P は点 A から一定の距離 r にある

したがって，**等式 $|z-\alpha|=r$ を満たす点 z のえがく図形は，点 A(α)を中心とする半径 r の円**である。

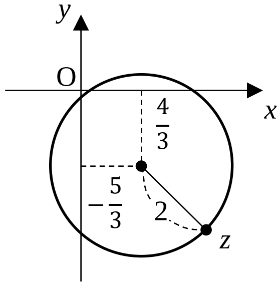
解答

(1)　$|z-2|=|z+3i|$ から，点 z は **2 点 2，$-3i$ を結ぶ線分の垂直二等分線** をえがく。



(2)　与えられた等式を変形すると　$\left|z-\dfrac{4-5i}{3}\right|=2$

よって，点zは **点$\dfrac{4-5i}{3}$を中心とする半径2の円** をえがく。



コ ラ ム

(1)，(2)は，x，yを実数とし，$z=x+yi$とおいて $|z|^2=z\,\bar{z}$ を利用すると，xy平面上の図形の方程式を求める方法で点 z のえがく図形を求めることもできる。

また，$z=x+yi$ とおくことで，次の点 z のえがく図形を求めることもできる。

① $z+\bar{z}=a$　（aは実数）

② $z-\bar{z}=bi$　（bは実数）

解答

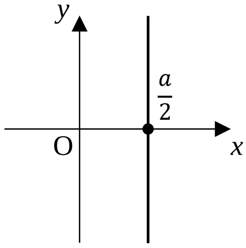
① $z=x+yi$とおくと，$\bar{z}=x-yi$であるから

$$z+\bar{z}=(x+yi)+(x-yi)=2x$$

よって，$2x=a$より　$x=\dfrac{a}{2}$

したがって，$z=\dfrac{a}{2}+yi$であるから，点zは

点$\dfrac{a}{2}$を通り，実軸に垂直な直線 をえがく。



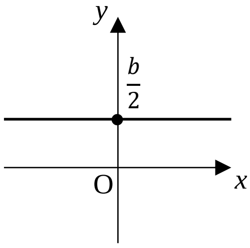
② $z=x+yi$とおくと，$\bar{z}=x-yi$であるから

$$z-\bar{z}=(x+yi)-(x-yi)=2yi$$

よって，$2yi=bi$より　$y=\dfrac{b}{2}$

したがって，$z=x+\dfrac{b}{2}i$であるから，点zは

点$\dfrac{b}{2}i$を通り，虚軸に垂直な直線 をえがく。



１５　等式を満たす点のえがく図形(2)　（アポロニウスの円）

等式 $|z|=2|z+3i|$ を満たす点 z のえがく図形を求めよ。

要　点

等式の両辺を 2 乗して，$|z|^2 = z\,\bar{z}$ を利用して絶対値をはずす。
共役な複素数の性質　$\overline{\boldsymbol{\alpha}+\boldsymbol{\beta}} = \bar{\boldsymbol{\alpha}}+\bar{\boldsymbol{\beta}}$，$\overline{\boldsymbol{\alpha}-\boldsymbol{\beta}} = \bar{\boldsymbol{\alpha}}-\bar{\boldsymbol{\beta}}$，$\boldsymbol{z\,\bar{z} = |z|^2}$
を用いて，「１４　**等式を満たす点のえがく図形(1)**」で学習したような，既知の形に変形する。

解答

等式の両辺を 2 乗すると　$|z|^2=4|z+3i|^2$
共役な複素数の性質により

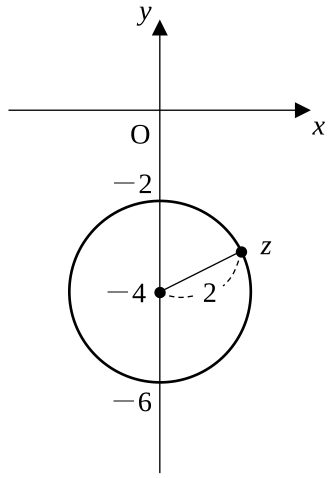
$$z\,\bar{z} = 4(z+3i)\overline{(z+3i)}$$
$$= 4(z+3i)(\bar{z}-3i)$$

展開すると　$z\,\bar{z} = 4(z+3i)(\bar{z}-3i) = 4(z\,\bar{z}-3i\,z+3i\,\bar{z}-9i^2) = 4z\,\bar{z}-12i\,z+12i\,\bar{z}+36$
整理すると　$z\,\bar{z}-4i\,z+4i\,\bar{z}+12=0$
絶対値の 2 乗ができるように変形すると

$$z(\bar{z}-4i)+4i(\bar{z}-4i)+16i^2+12=0$$
$$(z+4i)(\bar{z}-4i)=4$$
$$(z+4i)\overline{(z+4i)}=4$$
$$|z+4i|^2=2^2$$

$\overline{z+4i}=\bar{z}-4i$であることを考慮して，
$(z+4i)(\bar{z}-4i)$
の形ができるように
式変形する。

よって　$|z+4i|=2$
したがって，点 z は**点$-4i$ を中心とする半径 2 の円**をえがく。



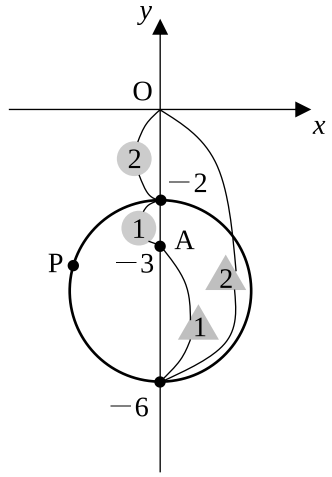
コ ラ ム

x，yを実数とし，$z=x+yi$とおいて $\boldsymbol{|z|^2 = z\,\bar{z}}$ を利用すると，xy平面上の図形の方程式を求める方法で点 z のえがく図形を求めることもできる。
また，2 定点 O(0)，A($-3i$)と動点 P(z)とすると，与えられた等式は
　OP＝2AP　　すなわち　OP：AP＝2：1
とみることができる。これはアポロニウスの円であるから，動点 P は線分 OA を 2：1 に

内分する点，すなわち　$\dfrac{0-6i}{2+1}=-2i$　と，

外分する点，すなわち　$\dfrac{-0-6i}{2-1}=-6i$

を直径とする円をえがく。



１６　**ともなって動く点のえがく図形**

点 z が原点 O を中心とする半径 1 の円周上を動くとき，$w=zi+2-i$ を満たす点 w のえがく図形を求めよ。

要　点

①　点 z の条件を満たす等式を求める。

②　与えられた w の条件式を z について解き，①の等式に代入する。

③　②の等式から，点 w のえがく図形を求める。

解答

点 z は原点 O(0)を中心とする半径 1 の円をえがくから　$|z|=1$　……①

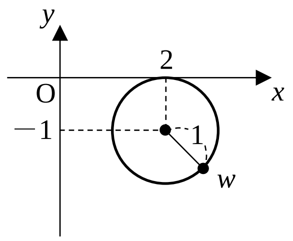
$w=zi+2-i$ から　$zi=w-2+i$　　$z=\dfrac{w-2+i}{i}$　　よって　$z=-iw+2i+1$

これを①に代入すると　$|-iw+2i+1|=1$　　$|-i|\left|w-2-\dfrac{1}{i}\right|=1$

ここで，$|-i|=\sqrt{0^2+(-1)^2}=1$，$-\dfrac{1}{i}=i$ であるから

$|w-(2-i)|=1$

したがって，点 w は **点 $2-i$ を中心とする半径 1 の円** をえがく。



１７　**2 直線のなす角，3 点が一直線上にある条件，垂直条件**

(1)　3 点を A$(2+3i)$，B$(-1+2i)$，C$(-i)$とするとき，∠BAC の大きさを求めよ。

(2)　3 点 A$(2+3i)$，B$(-1+2i)$，C$(a+i)$が次の条件を満たすように，実数 a の値を定めよ。

　①　3 点 A，B，C が一直線上にある　　　　②　AB⊥AC

要　点

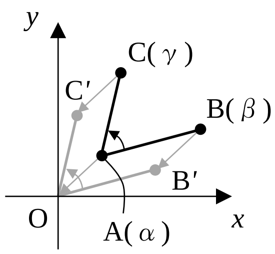
2 直線のなす角

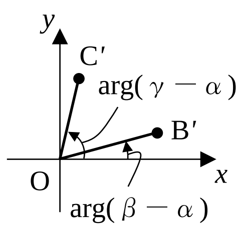
異なる 3 点 A(α)，B(β)，C(γ)に対して，半直線 AB から半直線 AC へ測った角∠BAC について考える。

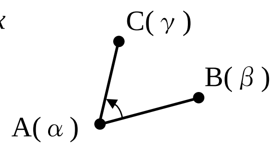
点 A を原点 O に移す平行移動によって，点 B，C をそれぞれ点 B′，C′ に移すとき，点 B′，C′ を表す複素数はそれぞれ $\beta-\alpha$，$\gamma-\alpha$ であるから

$\angle\mathrm{BAC}=\angle\mathrm{B'OC'}=\arg(\gamma-\alpha)-\arg(\beta-\alpha)=\arg\dfrac{\gamma-\alpha}{\beta-\alpha}$

以上をまとめると，異なる 3 点を A(α)，B(β)，C(γ)とするとき　$\boldsymbol{\angle\mathrm{BAC}=\arg\dfrac{\gamma-\alpha}{\beta-\alpha}}$



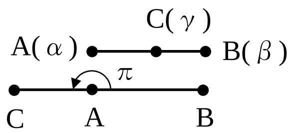


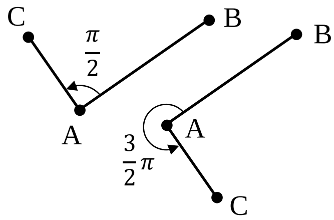


3 点が一直線上にある条件，垂直条件

異なる 3 点 A(α)，B(β)，C(γ)に対して，$0 \leqq \angle\mathrm{BAC} < 2\pi$ とすると

- $\angle\mathrm{BAC}=0$ または π のとき，3 点 A，B，C は一直線上にある。
- $\angle\mathrm{BAC}=\dfrac{\pi}{2}$ または $\dfrac{3}{2}\pi$ のとき，$\mathrm{AB}\perp\mathrm{AC}$ である。





したがって，異なる 3 点 A(α)，B(β)，C(γ)に対して，次のことが成り立つ。

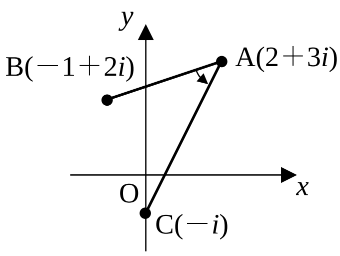
- **3点A，B，Cが一直線上にある** $\iff$ $\boldsymbol{\dfrac{\gamma-\alpha}{\beta-\alpha}}$ **が実数**
- $\mathbf{AB}\perp\mathbf{AC}$ $\iff$ $\boldsymbol{\dfrac{\gamma-\alpha}{\beta-\alpha}}$ **が純虚数**

解答

(1) $\angle\mathrm{BAC}=\arg\dfrac{-i-(2+3i)}{(-1+2i)-(2+3i)}=\arg\dfrac{-2-4i}{-3-i}$

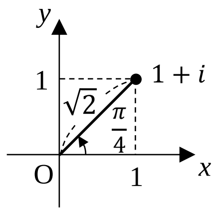
$$=\arg\frac{(-2-4i)(-3+i)}{(-3-i)(-3+i)}=\arg\frac{6-2i+12i-4i^2}{9-i^2}$$

$$=\arg\frac{10+10i}{10}=\arg(1+i)$$



ここで，$1+i=\sqrt{2}\left(\cos\dfrac{\pi}{4}+i\sin\dfrac{\pi}{4}\right)$ であるから

$$\arg(1+i)=\frac{\pi}{4}$$



よって　$\angle\mathrm{BAC}=\boldsymbol{\dfrac{\pi}{4}}$

(2) $\alpha=2+3i$，$\beta=-1+2i$，$\gamma=a+i$ とし，まず $\dfrac{\gamma-\alpha}{\beta-\alpha}$ を計算すると

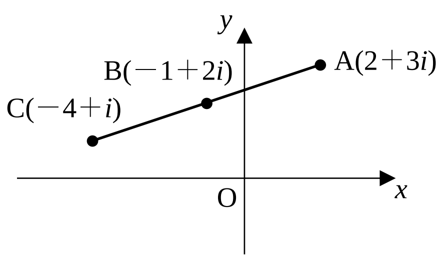
$$\frac{\gamma-\alpha}{\beta-\alpha}=\frac{(a+i)-(2+3i)}{(-1+2i)-(2+3i)}=\frac{(a-2)-2i}{-3-i}=\frac{\{(a-2)-2i\}(-3+i)}{(-3-i)(-3+i)}$$

$$=\frac{-3(a-2)+(a-2)i+6i-2i^2}{9-i^2}=\frac{(-3a+8)+(a+4)i}{10} \quad \cdots\cdots \text{(i)}$$

① 3 点 A，B，C が一直線上にあるには，

(i)が実数であればよい。

よって，$a+4=0$ から　$\boldsymbol{a=-4}$

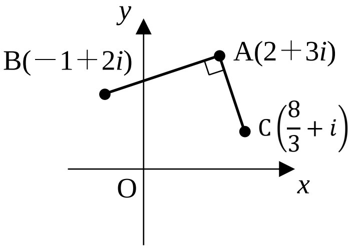


② AB⊥AC となるには，

(i)が純虚数であればよい。

よって，$-3a+8=0$ かつ $a+4\neq 0$ から

$$\boldsymbol{a=\frac{8}{3}}$$



１８　**三角形の形状**

(1)　異なる 3 点 A(α)，B(β)，C(γ)に対して，等式 $\beta+\alpha i=\gamma(1+i)$ が成り立つとき，△ABC はどのような三角形か。

(2)　異なる 3 点 O(0)，A(α)，B(β)に対して，等式 $\alpha^2-\alpha\beta+\beta^2=0$ が成り立つとき，△OAB はどのような三角形か。

要　点

(1)　異なる 3 点 A(α)，B(β)，C(γ)に対して，

$$\boldsymbol{\frac{\gamma-\alpha}{\beta-\alpha}=z}$$

となるとすると　**∠BAC＝arg z**

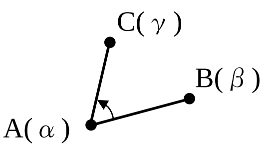
である。また，$\dfrac{|\gamma-\alpha|}{|\beta-\alpha|}=|z|$ であるから

AC：AB＝| z |：1

である。これらにより，2 辺の比とその間の角がわかるので，△ABC の形状がわかる。

よって，△ABC の形状を調べるときは，次の形に変形する。

$$\boldsymbol{\frac{\triangle-\bigcirc}{\square-\bigcirc}=x+yi}$$ **（○，□，△は頂点を表す複素数，x，yは実数）**



(2)　三角形の頂点の 1 つが原点であるから，複素数 $\dfrac{\alpha}{\beta}$ を求めれば，(1)と同様にして△OAB の形状を調べることができる。

解答

(1)　等式を変形すると，$\beta+\alpha i=\gamma+\gamma i$ より　$\beta-\gamma=(\gamma-\alpha)i$

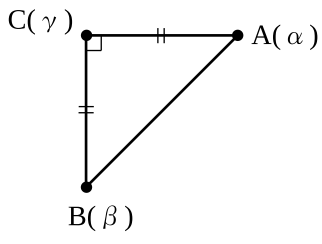
よって　$\dfrac{\beta-\gamma}{\alpha-\gamma}=-i$

ここで，$|-i|=1$ であり，

$\dfrac{\beta-\gamma}{\alpha-\gamma}$ は純虚数であるから

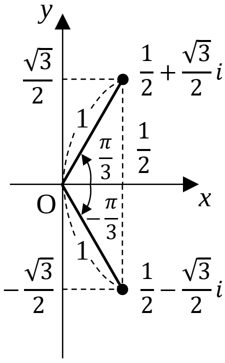
CA＝CB，　CA⊥CB

したがって，△ABC は **CA＝CB の直角二等辺三角形**である。



(2)　$\beta\neq0$ より $\beta^2\neq0$ であるから，等式の両辺を β^2 で割ると

$$\frac{\alpha^2}{\beta^2}-\frac{\alpha}{\beta}+1=0$$



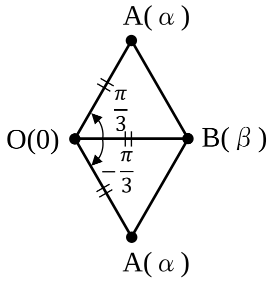
よって　$\dfrac{\alpha}{\beta}=\dfrac{-(-1)\pm\sqrt{1-4}}{2}=\dfrac{1\pm\sqrt{3}i}{2}$

ここで，$\dfrac{1\pm\sqrt{3}i}{2}=\cos\dfrac{\pi}{3}\pm i\sin\dfrac{\pi}{3}$ であるから

$$\left|\frac{1\pm\sqrt{3}i}{2}\right|=1,\quad \arg\frac{1\pm\sqrt{3}i}{2}=\pm\frac{\pi}{3}$$

したがって，$\mathrm{OB}=\mathrm{OA}$，$\angle\mathrm{BOA}=\pm\dfrac{\pi}{3}$ である

から，△OAB は **正三角形** である。



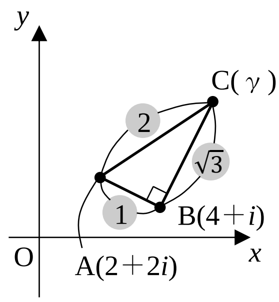
１９　**点αのまわりの回転移動と拡大・縮小**

(1)　$\alpha=2+2i$，$\beta=4+i$とするとき，点βを点αのまわりに$\dfrac{\pi}{4}$だけ回転した点を表す複素数zを求めよ。

(2)　3 点 A(2＋2i)，B(4＋i)，C(γ) を頂点とする三角形が，右の図のような

$$\mathrm{AB}:\mathrm{AC}:\mathrm{BC}=1:2:\sqrt{3}$$

の直角三角形であるとき，γ を求めよ。



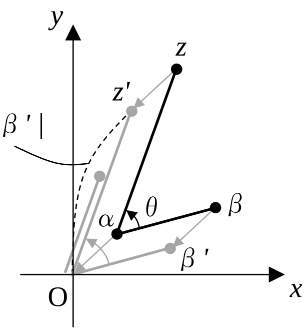
要　点

点 β を，点 α のまわりに θ だけ回転し，点 α からの距離を r 倍した点 z について考える。

点 α を原点 O に移す平行移動によって，点 β，z をそれぞれ点 β'，z' に移すとき，点 β'，z' を表す複素数はそれぞれ $\beta-\alpha$，$z-\alpha$ である。

点 β' を原点 O のまわりに θ だけ回転し，原点からの距離を r 倍した点が z' である。

よって，「7　**複素数の積を表す点**」で学習したことから　$z'=r(\cos\theta+i\sin\theta)\cdot\beta'$



すなわち　$z-\alpha=(\beta-\alpha)\cdot r(\cos\theta+i\sin\theta)$

以上をまとめると，点 β を，点 α のまわりに θ だけ回転し，点 α からの距離を r 倍した点 z を表す複素数は　$\boldsymbol{z=(\beta-\alpha)\cdot r(\cos\theta+i\sin\theta)+\alpha}$

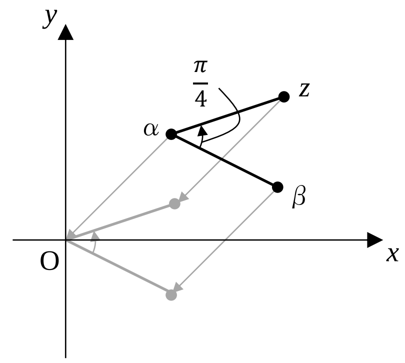
解答

(1)　$\boldsymbol{z}=\{(4+i)-(2+2i)\}\cdot\left(\cos\dfrac{\pi}{4}+i\sin\dfrac{\pi}{4}\right)+(2+2i)$

$=(2-i)\cdot\left(\dfrac{\sqrt{2}+\sqrt{2}i}{2}\right)+(2+2i)$

$=\sqrt{2}+\sqrt{2}i-\dfrac{\sqrt{2}}{2}i-\dfrac{\sqrt{2}}{2}i^2+2+2i$

$=\boldsymbol{2+\dfrac{3\sqrt{2}}{2}+\left(2+\dfrac{\sqrt{2}}{2}\right)i}$



(2)　$\alpha=2+2i$，$\beta=4+i$とすると，点γは，点βを点αのまわりに$\dfrac{\pi}{3}$だけ回転し，点αからの距離を 2 倍した点である。

よって　$\boldsymbol{\gamma}=\{(4+i)-(2+2i)\}\cdot 2\left(\cos\dfrac{\pi}{3}+i\sin\dfrac{\pi}{3}\right)+(2+2i)$

$=(2-i)\cdot 2\left(\dfrac{1+\sqrt{3}i}{2}\right)+(2+2i)=2+2\sqrt{3}i-i-\sqrt{3}i^2+2+2i$

$=\boldsymbol{4+\sqrt{3}+\left(1+2\sqrt{3}\right)i}$

$\boxed{\text{研究}}$　**不等式$|z-\alpha|\leqq r$の表す領域**

複素数 z が，不等式 $|3z-4+5i|\leqq 6$ を満たすとき，点 z の表す領域を図示せよ。

要　点

定点 A(α)と動点 P(z)，正の実数 r に対して

$|z-\alpha|\leqq r \iff \mathrm{AP}\leqq r \iff$ 2 点 P，A 間の距離は r 以下

したがって，**等式 $|z-\alpha|\leqq r$ を満たす点 z の表す領域は，点 A(α)を中心とする半径 r の円およびその内部**である。

〈注意〉・不等式 $|z-\alpha|<r$ の表す領域は，点 α を中心とする半径 r の円の内部

・不等式 $|z-\alpha|\geqq r$ の表す領域は，点 α を中心とする半径 r の円およびその外部

・不等式 $|z-\alpha|>r$ の表す領域は，点 α を中心とする半径 r の円の外部

解答

与えられた等式を変形すると　$\left|z-\dfrac{4-5i}{3}\right|\leqq 2$

よって，点zの表す領域は，

点$\dfrac{4-5i}{3}$を中心とする半径2の円およびその内部

で，右の図の斜線部分である。

ただし，境界線を含む。