

## 数学序論問題解説 #9

演習問題 4.1 次を証明せよ。

- (1)  $f(x), g(x)$  が偶関数のとき  $f(x)g(x)$  は偶関数である。
- (2)  $f(x), g(x)$  が奇関数のとき  $f(x)g(x)$  は偶関数である。
- (3)  $f(x)$  が偶関数,  $g(x)$  が奇関数のとき  $f(x)g(x)$  は奇関数である。

$h(x) = f(x)g(x)$  とおく。

- (1)  $f(x), g(x)$  は偶関数であるから, 任意の  $x$  に対し  $f(-x) = f(x), g(-x) = g(x)$  が成立している。このとき任意の  $x$  に対し

$$h(-x) = f(-x)g(-x) = f(x)g(x) = h(x)$$

となるので,  $h(x)$  は偶関数である。

- (2)  $f(x), g(x)$  は奇関数であるから, 任意の  $x$  に対し  $f(-x) = -f(x), g(-x) = -g(x)$  が成立している。このとき任意の  $x$  に対し

$$h(-x) = f(-x)g(-x) = (-f(x))(-g(x)) = f(x)g(x) = h(x)$$

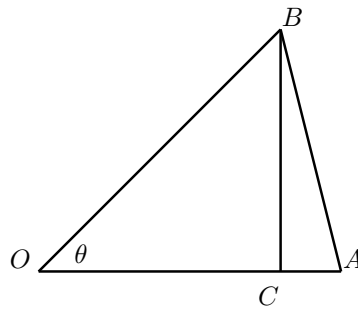
となるので,  $h(x)$  は偶関数である。

- (3)  $f(x)$  は偶関数,  $g(x)$  は奇関数であるから, 任意の  $x$  に対し  $f(-x) = f(x), g(-x) = -g(x)$  が成立している。このとき任意の  $x$  に対し

$$h(-x) = f(-x)g(-x) = f(x)(-g(x)) = -f(x)g(x) = -h(x)$$

となるので,  $h(x)$  は奇関数である。

演習問題 4.2 定理 4.1 を証明せよ。



$a = \overline{OA}, b = \overline{OB}, c = \overline{AB}$  とおく。点  $B$  から直線  $OA$  におろした垂線の足を  $C$  とする。また角  $\angle ABC = \varphi$  とおく。このとき  $\overline{OC} = b \cos \theta, \overline{BC} = b \sin \theta, \overline{AC} = c \sin \varphi, \overline{BC} = c \cos \varphi$  が成立している。 $a = \overline{OA} = \overline{OC} + \overline{CA} = b \cos \theta + c \sin \varphi$  より  $a - b \cos \theta = c \sin \varphi$  と変形して両辺を 2 乗すると

$$a^2 - 2ab \cos \theta + b^2 \cos^2 \theta = c^2 \sin^2 \varphi \tag{1}$$

となる。 $b \sin \theta = \overline{BC} = c \cos \varphi$  の両辺を 2 乗すると

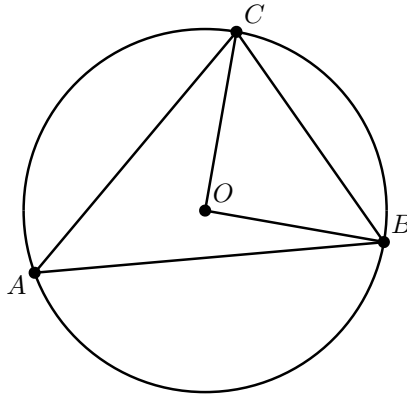
$$b^2 \sin^2 \theta = c^2 \cos^2 \varphi \tag{2}$$

が得られる。(1) 式と (2) 式を加えると

$$a^2 - 2ab \cos \theta + b^2 = c^2$$

となり, 定理 4.1 が証明される。

演習問題 4.3 定理 4.2 を証明せよ。



外接円の半径を  $r$  とする。円周角  $A$  に対応する中心角は  $\angle BOC$  であり, 中心角は円周角の 2 倍なので  $\angle BOC = 2\angle A$  が成立している。また  $\triangle OBC$  は二等辺 3 角形なので  $r \sin A = \frac{\overline{BC}}{2} = \frac{a}{2}$  より

$$\frac{a}{\sin A} = 2r$$

が成立する。他の角についても同様に成立するので

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C} = 2r$$

が成立する。

演習問題 4.4 上式 (1),(2) を証明せよ。

点  $O, A, A', B, B', C, D, E$  を下図のようにおく。  $x' = \overline{OD} = \overline{OE} - \overline{DE}$  である。

$$\overline{OE} = \overline{OB'} \cos \theta = \overline{OB} \cos \theta = x \cos \theta$$

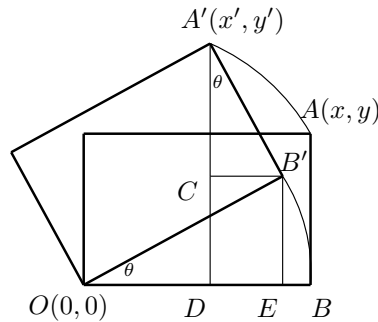
および

$$\overline{DE} = \overline{CB'} = \overline{A'B'} \sin \theta = \overline{AB} \sin \theta = y \sin \theta$$

より

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta$$

が従う。



$y' = \overline{DA'} = \overline{A'C} + \overline{CD}$  である。

$$\overline{A'C} = \overline{A'B'} \cos \theta = \overline{AB} \cos \theta = y \cos \theta$$

および

$$\overline{CD} = \overline{B'E} = \overline{OB'} \sin \theta = x \sin \theta$$

より

$$y' = x \sin \theta + y \cos \theta$$

が従う。

演習問題 4.5 加法定理を用いて以下の公式を示せ。

(1)

$$\begin{aligned} \sin \left( x + \frac{\pi}{2} \right) &= \cos x, & \sin \left( x - \frac{\pi}{2} \right) &= -\cos x \\ \cos \left( x + \frac{\pi}{2} \right) &= -\sin x, & \cos \left( x - \frac{\pi}{2} \right) &= \sin x \end{aligned}$$

ここでは2通りの証明方法を紹介しておく。最初に高校でやったような三角関数の加法定理を用いる通常の方法、次にオイラーの公式を用いる方法を紹介する。

$\sin \frac{\pi}{2} = 1$ ,  $\cos \frac{\pi}{2} = 0$ ,  $\sin \left( -\frac{\pi}{2} \right) = -1$ ,  $\cos \left( -\frac{\pi}{2} \right) = 0$  が成立している。

$$\begin{aligned} \sin \left( x + \frac{\pi}{2} \right) &= \sin x \cos \frac{\pi}{2} + \sin \frac{\pi}{2} \cos x \\ &= \sin x \cdot 0 + 1 \cdot \cos x = \cos x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin \left( x - \frac{\pi}{2} \right) &= \sin \left( x + \left( -\frac{\pi}{2} \right) \right) \\ &= \sin x \cos \left( -\frac{\pi}{2} \right) + \sin \left( -\frac{\pi}{2} \right) \cos x \\ &= \sin x \cdot 0 + (-1) \cdot \cos x = -\cos x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \left( x + \frac{\pi}{2} \right) &= \cos x \cos \frac{\pi}{2} - \sin x \sin \frac{\pi}{2} \\ &= \cos x \cdot 0 - \sin x \cdot 1 = -\sin x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \left( x - \frac{\pi}{2} \right) &= \cos \left( x + \left( -\frac{\pi}{2} \right) \right) \\ &= \cos x \cos \left( -\frac{\pi}{2} \right) - \sin x \sin \left( -\frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

$$= \cos x \cdot 0 - \sin x \cdot (-1) = \sin x$$

次がオイラーの公式を用いる証明である。 $\exp\left(i\frac{\pi}{2}\right) = e^{i\frac{\pi}{2}} = \cos\frac{\pi}{2} + i\sin\frac{\pi}{2} = i$  ,  
 $\exp\left(-i\frac{\pi}{2}\right) = e^{-i\frac{\pi}{2}} = \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) + i\sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -i$  が成立している。

$$\begin{aligned} \exp\left(i\left(x + \frac{\pi}{2}\right)\right) &= \exp(ix) \exp\left(i\frac{\pi}{2}\right) = (\cos x + i\sin x)i = -\sin x + i\cos x \quad \text{および} \\ \exp\left(i\left(x + \frac{\pi}{2}\right)\right) &= \cos\left(x + \frac{\pi}{2}\right) + i\sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

の実部と虚部を比較することにより

$$\cos\left(x + \frac{\pi}{2}\right) = -\sin x, \quad \sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right) = \cos x$$

が得られる。同様に

$$\begin{aligned} \exp\left(i\left(x - \frac{\pi}{2}\right)\right) &= \exp(ix) \exp\left(-i\frac{\pi}{2}\right) = (\cos x + i\sin x)(-i) = \sin x - i\cos x \quad \text{および} \\ \exp\left(i\left(x - \frac{\pi}{2}\right)\right) &= \cos\left(x - \frac{\pi}{2}\right) + i\sin\left(x - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

の実部と虚部を比較することにより

$$\cos\left(x - \frac{\pi}{2}\right) = \sin x, \quad \sin\left(x - \frac{\pi}{2}\right) = -\cos x$$

が得られる。

(2)

$$\sin(x \pm \pi) = -\sin x, \quad \cos(x \pm \pi) = -\cos x$$

$\sin \pi = 0$  ,  $\cos \pi = -1$  ,  $\sin(-\pi) = 0$  ,  $\cos(-\pi) = -1$  が成立している。

$$\begin{aligned} \sin(x + \pi) &= \sin x \cos \pi + \sin \pi \cos x \\ &= \sin x \cdot (-1) + 0 \cdot \cos x = -\sin x \\ \sin(x - \pi) &= \sin(x + (-\pi)) \\ &= \sin x \cos(-\pi) + \sin(-\pi) \cos x \\ &= \sin x \cdot (-1) + 0 \cdot \cos x = -\sin x \\ \cos(x + \pi) &= \cos x \cos \pi - \sin x \sin \pi \\ &= \cos x \cdot (-1) + \sin x \cdot 0 = -\cos x \\ \cos(x - \pi) &= \cos(x + (-\pi)) \\ &= \cos x \cos(-\pi) - \sin x \sin(-\pi) \\ &= \cos x \cdot (-1) + \sin x \cdot 0 = -\cos x \end{aligned}$$

次がオイラーの公式を用いる証明である。 $\exp(i\pi) = e^{i\pi} = \cos \pi + i\sin \pi = -1$  ,  
 $\exp(-i\pi) = e^{-i\pi} = \cos(-\pi) + i\sin(-\pi) = -1$  が成立している。

$$\begin{aligned} \exp(i(x + \pi)) &= \exp(ix) \exp(i\pi) = (\cos x + i\sin x)(-1) = -\cos x - i\sin x \quad \text{および} \\ \exp(i(x + \pi)) &= \cos(x + \pi) + i\sin(x + \pi) \end{aligned}$$

の実部と虚部を比較することにより

$$\cos(x + \pi) = -\cos x, \quad \sin(x + \pi) = -\sin x$$

が得られる。同様に

$$\begin{aligned} \exp(i(x - \pi)) &= \exp(ix) \exp(-i\pi) = (\cos x + i \sin x)(-1) = -\cos x - i \sin x && \text{および} \\ \exp(i(x - \pi)) &= \cos(x - \pi) + i \sin(x - \pi) \end{aligned}$$

の実部と虚部を比較することにより

$$\cos(x - \pi) = -\cos x, \quad \sin(x - \pi) = -\sin x$$

が得られる。

(3)  $\tan x$  の加法定理 :

$$\tan(\alpha + \beta) = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{1 - \tan \alpha \tan \beta}, \quad \tan(\alpha - \beta) = \frac{\tan \alpha - \tan \beta}{1 + \tan \alpha \tan \beta}$$

$$\begin{aligned} \tan(\alpha + \beta) &= \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos(\alpha + \beta)} = \frac{\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta} \\ &= \frac{\frac{\sin \alpha \cos \beta}{\cos \alpha \cos \beta} + \frac{\cos \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \cos \beta}}{\frac{\cos \alpha \cos \beta}{\cos \alpha \cos \beta} - \frac{\sin \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \cos \beta}} = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{1 - \tan \alpha \tan \beta} \end{aligned}$$

次を示すために  $\theta_1 + \theta_2$  を  $\theta_1 - \theta_2$  に変えた場合の加法定理を示しておく。 $\sin(-\theta_2) = -\sin \theta_2$  および  $\cos(-\theta_2) = \cos \theta_2$  は既知とする。

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

これを用いる。

$$\begin{aligned} \tan(\alpha - \beta) &= \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos(\alpha - \beta)} = \frac{\sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta} \\ &= \frac{\frac{\sin \alpha \cos \beta}{\cos \alpha \cos \beta} - \frac{\cos \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \cos \beta}}{\frac{\cos \alpha \cos \beta}{\cos \alpha \cos \beta} + \frac{\sin \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \cos \beta}} = \frac{\tan \alpha - \tan \beta}{1 + \tan \alpha \tan \beta} \end{aligned}$$

次がオイラーの公式を用いる証明である。ただし  $\tan$  の場合はそれほど有効でないかもしれないが、他にもこの方法を紹介しているので、一応紹介しておこう。最初に

$$\begin{aligned}(e^{i\alpha} - e^{-i\alpha})(e^{i\beta} + e^{-i\beta}) + (e^{i\alpha} + e^{-i\alpha})(e^{i\beta} - e^{-i\beta}) &= 2(e^{i(\alpha+\beta)} - e^{-i(\alpha+\beta)}) \\ (e^{i\alpha} + e^{-i\alpha})(e^{i\beta} + e^{-i\beta}) + (e^{i\alpha} - e^{-i\alpha})(e^{i\beta} - e^{-i\beta}) &= 2(e^{i(\alpha+\beta)} + e^{-i(\alpha+\beta)})\end{aligned}$$

が成立することに注意しておく。

$$\tan x = \frac{\sin x}{\cos x} = \frac{\frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}}{\frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}} = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{i(e^{ix} + e^{-ix})}$$

が成立しているので、

$$\begin{aligned}\tan(\alpha + \beta) &= \frac{e^{i(\alpha+\beta)} - e^{-i(\alpha+\beta)}}{i(e^{i(\alpha+\beta)} + e^{-i(\alpha+\beta)})} \\ &= \frac{(e^{i\alpha} - e^{-i\alpha})(e^{i\beta} + e^{-i\beta}) + (e^{i\alpha} + e^{-i\alpha})(e^{i\beta} - e^{-i\beta})}{i((e^{i\alpha} + e^{-i\alpha})(e^{i\beta} + e^{-i\beta}) + (e^{i\alpha} - e^{-i\alpha})(e^{i\beta} - e^{-i\beta}))} \\ &= \frac{\frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{i(e^{i\alpha} + e^{-i\alpha})} + \frac{e^{i\beta} - e^{-i\beta}}{i(e^{i\beta} + e^{-i\beta})}}{1 - \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{i(e^{i\alpha} + e^{-i\alpha})} \frac{e^{i\beta} - e^{-i\beta}}{i(e^{i\beta} + e^{-i\beta})}} \\ &= \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{1 - \tan \alpha \tan \beta}\end{aligned}$$

$\tan(\alpha - \beta)$  は  $\tan(\alpha + \beta)$  の公式に

$$\tan(-x) = \frac{e^{i(-x)} - e^{-i(-x)}}{e^{i(-x)} + e^{-i(-x)}} = -\frac{e^{ix} + e^{-ix}}{e^{ix} - e^{-ix}} = -\tan x$$

を適用しても得られるし、最初に 2 式の  $\beta$  を  $-\beta$  に変えた式

$$\begin{aligned}(e^{i\alpha} - e^{-i\alpha})(e^{i\beta} + e^{-i\beta}) - (e^{i\alpha} + e^{-i\alpha})(e^{i\beta} - e^{-i\beta}) &= 2(e^{i(\alpha-\beta)} - e^{-i(\alpha-\beta)}) \\ (e^{i\alpha} + e^{-i\alpha})(e^{i\beta} + e^{-i\beta}) - (e^{i\alpha} - e^{-i\alpha})(e^{i\beta} - e^{-i\beta}) &= 2(e^{i(\alpha-\beta)} + e^{-i(\alpha-\beta)})\end{aligned}$$

を用いて直接計算しても得られる。

(4) 倍角の公式：

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta, \quad \cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta = 2 \cos^2 \theta - 1 = 1 - 2 \sin^2 \theta$$

$$\begin{aligned}\sin 2\theta &= \sin(\theta + \theta) = \sin \theta \cos \theta + \cos \theta \sin \theta \\ &= 2 \sin \theta \cos \theta\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\cos 2\theta &= \cos(\theta + \theta) = \cos \theta \cos \theta - \sin \theta \sin \theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \\ &= \cos^2 \theta - (1 - \cos^2 \theta) = 2 \cos^2 \theta - 1 \\ &= 2(1 - \sin^2 \theta) - 1 = 1 - 2 \sin^2 \theta\end{aligned}$$

次がオイラーの公式を用いる証明である。

$$\exp(i2\theta) = \exp(i\theta)^2 = (\cos\theta + i\sin\theta)^2 = \cos^2\theta - \sin^2\theta + i2\sin\theta\cos\theta \quad \text{および}$$

$$\exp(i2\theta) = \cos(2\theta) + i\sin(2\theta)$$

の実部と虚部を比較することで得られる。

(5) 3倍角の公式：

$$\sin 3\theta = -4\sin^3\theta + 3\sin\theta \quad \cos 3\theta = 4\cos^3\theta - 3\cos\theta$$

(4) の式を用いる。

$$\begin{aligned} \sin 3\theta &= \sin(\theta + 2\theta) = \sin\theta\cos 2\theta + \cos\theta\sin 2\theta \\ &= \sin\theta(1 - 2\sin^2\theta) + \cos\theta(2\sin\theta\cos\theta) \\ &= \sin\theta - 2\sin^3\theta + 2\sin\theta\cos^2\theta \\ &= \sin\theta - 2\sin^3\theta + 2\sin(1 - \sin^2\theta) \\ &= 3\sin\theta - 4\sin^3\theta \\ \cos 3\theta &= \cos(\theta + 2\theta) = \cos\theta\cos 2\theta - \sin\theta\sin 2\theta \\ &= \cos\theta(2\cos^2\theta - 1) - \sin\theta(2\sin\theta\cos\theta) \\ &= 2\cos^3\theta - \cos\theta - 2\cos\theta\sin^2\theta \\ &= 2\cos^3\theta - \cos\theta - 2\cos\theta(1 - \cos^2\theta) \\ &= 4\cos^3\theta - 3\cos\theta \end{aligned}$$

次がオイラーの公式を用いる証明である。

$$\begin{aligned} \exp(i3\theta) &= \exp(i\theta)^3 = (\cos\theta + i\sin\theta)^3 \\ &= \cos^3\theta + 3\cos^2\theta(i\sin\theta) + 3\cos\theta(i\sin\theta)^2 + (i\sin\theta)^3 \\ &= (\cos^3\theta - 3\cos\theta\sin^2\theta) + i(3\cos^2\theta\sin\theta - \sin^3\theta) \quad \text{および} \\ \exp(i3\theta) &= \cos(3\theta) + i\sin(3\theta) \end{aligned}$$

の実部と虚部を比較する。このとき  $\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$  を用いると結果が得られる。

(6) 半角の公式：

$$\sin^2\theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}, \quad \cos^2\theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2}$$

(4) のコサインの倍角公式より従う。 $\theta$  を  $\frac{\theta}{2}$  で置き換えて

$$\sin^2\frac{\theta}{2} = \frac{1 - \cos\theta}{2}, \quad \cos^2\frac{\theta}{2} = \frac{1 + \cos\theta}{2}$$

という書き方もされる。

次がオイラーの公式を用いる証明である。

$$\begin{aligned}\sin^2 \theta &= \left( \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i} \right)^2 = \frac{e^{i2\theta} - 2 + e^{-i2\theta}}{-4} \\ &= \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{e^{i2\theta} + e^{-i2\theta}}{2} \right) = \frac{1 - \cos(2\theta)}{2} \\ \cos^2 \theta &= \left( \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \right)^2 = \frac{e^{i2\theta} + 2 + e^{-i2\theta}}{4} \\ &= \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{e^{i2\theta} + e^{-i2\theta}}{2} \right) = \frac{1 + \cos(2\theta)}{2}\end{aligned}$$

(7) 和積公式：

$$\begin{aligned}\sin \alpha + \sin \beta &= 2 \sin \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) \\ \sin \alpha - \sin \beta &= 2 \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \sin \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) \\ \cos \alpha + \cos \beta &= 2 \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) \\ \cos \alpha - \cos \beta &= -2 \sin \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \sin \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right)\end{aligned}$$

$$X = \frac{\alpha + \beta}{2}, Y = \frac{\alpha - \beta}{2} \text{ とおくと}$$

$$X + Y = \alpha, \quad X - Y = \beta$$

が成立している。

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= \sin(X + Y) = \sin X \cos Y + \cos X \sin Y \\ \sin \beta &= \sin(X - Y) = \sin X \cos Y - \cos X \sin Y\end{aligned}$$

が成立しているので

$$\begin{aligned}\sin \alpha + \sin \beta &= \sin X \cos Y + \cos X \sin Y + \sin X \cos Y - \cos X \sin Y \\ &= 2 \sin X \cos Y = 2 \sin \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) \\ \sin \alpha - \sin \beta &= \sin X \cos Y + \cos X \sin Y - (\sin X \cos Y - \cos X \sin Y) \\ &= 2 \cos X \sin Y = 2 \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \sin \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right)\end{aligned}$$

が得られる。

$$\begin{aligned}\cos \alpha &= \cos(X + Y) = \cos X \cos Y - \sin X \sin Y \\ \cos \beta &= \cos(X - Y) = \cos X \cos Y + \sin X \sin Y\end{aligned}$$



が成立しているので

$$\begin{aligned}\cos \alpha + \cos \beta &= \cos X \cos Y - \sin X \sin Y + \cos X \cos Y - \sin X \sin Y \\ &= 2 \cos X \cos Y = 2 \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) \\ \cos \alpha - \cos \beta &= \cos X \cos Y - \sin X \sin Y - (\cos X \cos Y - \sin X \sin Y) \\ &= -2 \sin X \sin Y = -2 \sin \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \sin \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right)\end{aligned}$$

オイラーの公式を用いた証明は、積和公式とまとめて次で行う。

(8) 積和公式：

$$\begin{aligned}\sin \alpha \sin \beta &= -\frac{1}{2} \left\{ \cos(\alpha + \beta) - \cos(\alpha - \beta) \right\} \\ \sin \alpha \cos \beta &= \frac{1}{2} \left\{ \sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta) \right\} \\ \cos \alpha \sin \beta &= \frac{1}{2} \left\{ \sin(\alpha + \beta) - \sin(\alpha - \beta) \right\} \\ \cos \alpha \cos \beta &= \frac{1}{2} \left\{ \cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta) \right\}\end{aligned}$$

$A = \alpha + \beta$ ,  $B = \alpha - \beta$  とおくと

$$\alpha = \frac{A + B}{2}, \quad \beta = \frac{A - B}{2}$$

が成立している。すでに示した (7) の式において  $\alpha, \beta$  をそれぞれ  $A, B$  に置き換える。(7) の最初の式を置き換えると

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \left( \frac{A + B}{2} \right) \cos \left( \frac{A - B}{2} \right) = 2 \sin \alpha \cos \beta$$

即ち

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \left\{ \sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta) \right\}$$

が得られる。2 番目の式を置き換えると

$$\sin A - \sin B = 2 \cos \left( \frac{A + B}{2} \right) \sin \left( \frac{A - B}{2} \right) = 2 \cos \alpha \sin \beta$$

即ち

$$\cos \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} \left\{ \sin(\alpha + \beta) - \sin(\alpha - \beta) \right\}$$

が得られる。3 番目の式を置き換えると

$$\cos A + \cos B = 2 \cos \left( \frac{A + B}{2} \right) \cos \left( \frac{A - B}{2} \right) = 2 \cos \alpha \cos \beta$$

即ち

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \left\{ \cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta) \right\}$$

が得られる。4 番目の式を置き換えると

$$\cos A - \cos B = -2 \sin \left( \frac{A+B}{2} \right) \sin \left( \frac{A-B}{2} \right) = -2 \sin \alpha \sin \beta$$

即ち

$$\sin \alpha \sin \beta = -\frac{1}{2} \left\{ \cos(\alpha + \beta) - \cos(\alpha - \beta) \right\}$$

が得られる。

次がオイラーの公式を用いる証明である。

$$\begin{aligned} \sin(x+y) \sin(x-y) &= \frac{e^{i(x+y)} - e^{-i(x+y)}}{2i} \frac{e^{i(x-y)} - e^{-i(x-y)}}{2i} \\ &= \frac{e^{ix} e^{iy} - e^{-ix} e^{-iy}}{2i} \frac{e^{ix} e^{-iy} - e^{-ix} e^{iy}}{2i} \\ &= -\frac{1}{4} (e^{i2x} - e^{-i2y} - e^{i2y} + e^{-2ix}) \\ &= -\frac{1}{2} \left( \frac{e^{i2x} + e^{-i2x}}{2} - \frac{e^{i2y} + e^{-i2y}}{2} \right) \\ &= -\frac{1}{2} (\cos 2x - \cos 2y) \end{aligned}$$

この式において  $\alpha = 2x$ ,  $\beta = 2y$  とおくと和積公式の 4 番目の式が得られる。 $\alpha = x + y$ ,  $\beta = x - y$  とおくと積和公式の 1 番目の式が得られる。

$$\begin{aligned} \sin(x+y) \cos(x-y) &= \frac{e^{i(x+y)} - e^{-i(x+y)}}{2i} \frac{e^{i(x-y)} + e^{-i(x-y)}}{2} \\ &= \frac{e^{ix} e^{iy} - e^{-ix} e^{-iy}}{2i} \frac{e^{ix} e^{-iy} + e^{-ix} e^{iy}}{2} \\ &= \frac{1}{4i} (e^{i2x} - e^{-i2y} + e^{i2y} - e^{-2ix}) \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{e^{i2x} - e^{-i2x}}{2i} + \frac{e^{i2y} - e^{-i2y}}{2i} \right) \\ &= \frac{1}{2} (\sin 2x + \sin 2y) \end{aligned}$$

この式において  $\alpha = 2x$ ,  $\beta = 2y$  とおくと和積公式の 1 番目の式が得られる。 $\alpha = x + y$ ,  $\beta = x - y$  とおくと積和公式の 2 番目の式が得られる。

$$\begin{aligned}
\cos(x+y)\sin(x-y) &= \frac{e^{i(x+y)} + e^{-i(x+y)}}{2} \frac{e^{i(x-y)} - e^{-i(x-y)}}{2i} \\
&= \frac{e^{ix}e^{iy} + e^{-ix}e^{-iy}}{2} \frac{e^{ix}e^{-iy} - e^{-ix}e^{iy}}{2i} \\
&= \frac{1}{4i} (e^{i2x} + e^{-i2y} - e^{i2y} - e^{-2ix}) \\
&= \frac{1}{2} \left( \frac{e^{i2x} - e^{-i2x}}{2i} - \frac{e^{i2y} - e^{-i2y}}{2i} \right) \\
&= \frac{1}{2} (\sin 2x - \sin 2y)
\end{aligned}$$

この式において  $\alpha = 2x$ ,  $\beta = 2y$  とおくと和積公式の 2 番目の式が得られる。 $\alpha = x + y$ ,  $\beta = x - y$  とおくと積和公式の 3 番目の式が得られる。

$$\begin{aligned}
\cos(x+y)\cos(x-y) &= \frac{e^{i(x+y)} + e^{-i(x+y)}}{2} \frac{e^{i(x-y)} + e^{-i(x-y)}}{2} \\
&= \frac{e^{ix}e^{iy} + e^{-ix}e^{-iy}}{2} \frac{e^{ix}e^{-iy} + e^{-ix}e^{iy}}{2} \\
&= \frac{1}{4} (e^{i2x} + e^{-i2y} + e^{i2y} + e^{-2ix}) \\
&= \frac{1}{2} \left( \frac{e^{i2x} + e^{-i2x}}{2} + \frac{e^{i2y} + e^{-i2y}}{2} \right) \\
&= \frac{1}{2} (\cos 2x + \cos 2y)
\end{aligned}$$

この式において  $\alpha = 2x$ ,  $\beta = 2y$  とおくと和積公式の 3 番目の式が得られる。 $\alpha = x + y$ ,  $\beta = x - y$  とおくと積和公式の 4 番目の式が得られる。