

# 圏論とは何か

alg-d

[http://alg-d.com/math/kan\\_extension/](http://alg-d.com/math/kan_extension/)

2017年8月1日

ここでは圏の定義と例を使って、圏論がどういうものなのかを紹介する。

## 目次

1	圏論とは . . . . .	1
2	圏の例 . . . . .	5
3	関手の例 . . . . .	9

## 1 圏論とは

「 $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$  と  $\mathbb{Z}/5\mathbb{Z}$  は (加法群として) 同型か?」という問題を考える。これはもちろん同型ではない。何故かと言うと  $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$  は 4 つの元からなる集合で、 $\mathbb{Z}/5\mathbb{Z}$  は 5 つの元からなる集合だから、つまりそもそも濃度が違う (= 全単射が無い) から、同型になりえない。これは少し難しく言えば

群として同型  $\implies$  集合として同型 (濃度が同じと言うことを、あえてこう書く)

という命題の対偶を考えているのである。

もう少し難しい例を出すと、位相空間には「基本群」という概念がある。位相空間  $X$  に対して基本群と呼ばれる群  $\pi(X)$  が構成される。(あとで書くように厳密には少し異なるが、今は気にしないことにする。) この「基本群」は次を満たす。

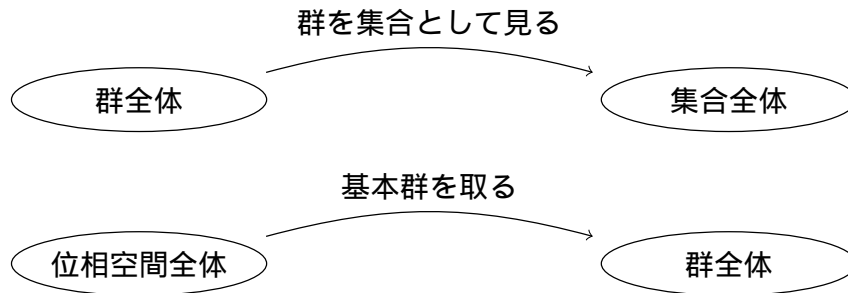
位相空間が同型 (= 同相)  $\implies$  基本群が同型

式で書けば

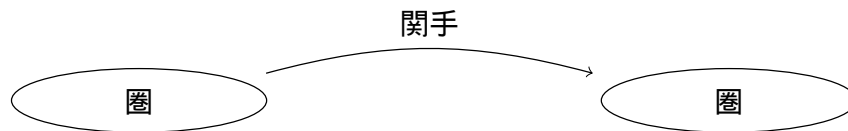
$$X \cong Y \implies \pi(X) \cong \pi(Y)$$

という定理が成り立つことになる．故に位相空間が同相かどうか調べるには，まず基本群を調べればよい．(基本群が同型でなければ、元の位相空間は同相ではない．)

この状況を一般化したものが圏論である．絵で書けば



が先の二つの例であるが，これを一般化したものが「圏」と「関手」になる．



定義. 圏 (category)  $C$  とは二つの (集合とは限らない) 集まり  $\text{Ob}(C), \text{Mor}(C)$  の組であって，以下の条件をみたすものをいう．なお元  $a \in \text{Ob}(C)$  を対象 (object)， $f \in \text{Mor}(C)$  を射 (morphism) と呼ぶ．

- (1) 各  $f \in \text{Mor}(C)$  に対して，ドメイン (domain) と呼ばれる対象  $\text{dom}(f) \in \text{Ob}(C)$  とコドメイン (codomain) と呼ばれる対象  $\text{cod}(f) \in \text{Ob}(C)$  が定められている．  
 $\text{dom}(f) = a, \text{cod}(f) = b$  であることを  $f: a \rightarrow b$  や  $a \xrightarrow{f} b$  と書いて表す．また  $a, b \in C$  に対して  $\text{Hom}_C(a, b) := \{f \in \text{Mor}(C) \mid f: a \rightarrow b\}$  と書く．
- (2) 二つの射  $f: a \rightarrow b, g: b \rightarrow c$  に対して合成射と呼ばれる射  $g \circ f: a \rightarrow c$  が定められている．
- (3) 射の合成は結合律を満たす．即ち， $f: a \rightarrow b, g: b \rightarrow c, h: c \rightarrow d$  に対して  $(h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f)$  が成り立つ．
- (4) 各  $a \in \text{Ob}(C)$  に対して，恒等射と呼ばれる射  $\text{id}_a: a \rightarrow a$  が存在し，射の合成に関する単位元となる．即ち  $f: a \rightarrow b$  に対して  $f \circ \text{id}_a = f, \text{id}_b \circ f = f$  である．

文脈から明らかな場合， $a \in \text{Ob}(C)$  を単に  $a \in C$ ， $f \in \text{Mor}(C)$  を単に  $f \in C$  と書くことがある．

定義を見ると，圏は「集合と写像」を意識して定義されていることが分かると思う．なので一番基本的な例は次に出す「集合と写像のなす圏」である．

例 1. 集合を対象, 写像を射とすれば圏になる. この圏を  $\text{Set}$  で表す. より詳しく書けば以下のようなになる.

- $\text{Ob}(\text{Set}) := \{X \mid X = X\} = \text{「全ての集合の集まり」}$  と定める.
- $\text{Mor}(\text{Set}) := \{f \mid f \text{ はある集合 } X \text{ からある集合 } Y \text{ への写像}\}$  と定める.
- $X$  から  $Y$  への写像  $f$  に対して  $\text{dom}(f) := X, \text{cod}(f) := Y$  と定める.
- 射の合成  $g \circ f$  は通常の写像の合成で定める. 勿論この合成は結合律を満たす.
- 集合  $X$  に対して恒等射  $\text{id}_X$  を恒等写像  $X \rightarrow X$  で定める. 勿論  $f \circ \text{id} = f, \text{id} \circ g = g$  を満たす.

以上により圏  $\text{Set}$  が得られた. □

同じようにして, 以下のような圏が得られる.

例 2. 群を対象, 群準同型を射とすれば圏になる. この圏を  $\text{Grp}$  で表す. (恒等写像は群準同型であること, 群準同型の合成が群準同型になること, に注意すればよい.) □

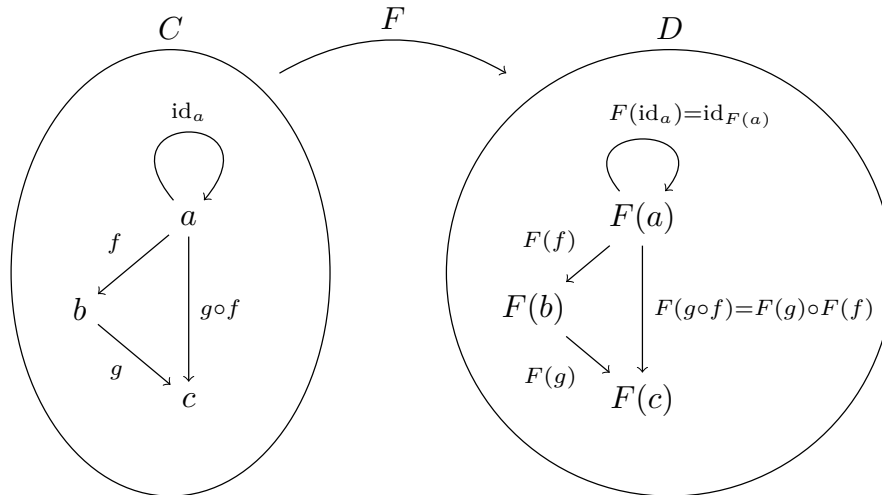
例 3. 位相空間を対象, 連続写像を射とすれば圏になる. この圏を  $\text{Top}$  で表す. □

次に関手を定義する. これは圏の「準同型」とでも言うべきものである.

定義.  $C, D$  を圏とする.  $C$  から  $D$  への関手 (functor)  $F: C \rightarrow D$  とは  $a \in \text{Ob}(C)$  に  $F(a) \in \text{Ob}(D)$  を,  $f \in \text{Mor}(C)$  に  $F(f) \in \text{Mor}(D)$  を対応させる関数であって, 以下を満たすものである.

- (1)  $f: a \rightarrow b$  のとき  $F(f): F(a) \rightarrow F(b)$  である.  
(即ち  $\text{dom}(F(f)) = F(\text{dom}(f)), \text{cod}(F(f)) = F(\text{cod}(f))$  となる.)
- (2)  $\text{cod}(f) = \text{dom}(g)$  のとき  $F(g \circ f) = F(g) \circ F(f)$ .
- (3)  $a \in C$  に対して  $F(\text{id}_a) = \text{id}_{F(a)}$ .

この定義を絵で書くと次のようになる。



$F(a)$  を  $Fa$  ,  $F(f)$  を  $Ff$  と書くこともある。

例 4.  $U: \mathbf{Grp} \rightarrow \mathbf{Set}$  を以下のように定義する。

- 群  $\langle G, \cdot \rangle \in \mathbf{Grp}$  に対して  $U(\langle G, \cdot \rangle) := G$  と定める。即ち, 群  $G$  に対してその「演算を忘れた」集合  $G$  を与える。
- 群準同型  $f: G \rightarrow G'$  に対して  $U(f) := f$  と定める。(群準同型は写像であることに注意する。)

このように定めれば明らかに  $U$  は関手である。このような構造を忘れる関手  $U$  を一般に忘却関手 (forgetful functor) と呼ぶ。 □

最初に指摘したように  $f \in \mathbf{Mor}(\mathbf{Grp})$  が群の同型写像ならば  $U(f) \in \mathbf{Mor}(\mathbf{Set})$  が集合の同型写像 (即ち全単射) となるのであるが, 実はこの性質は一般の関手に対して成り立つ。それを示す為, 一般の圏  $C$  における同型を定義する。

定義.  $C$  を圏,  $a, b \in C$  を対象とする。

- (1)  $C$  の射  $f: a \rightarrow b$  が同型射  
 $\iff$  ある射  $g: b \rightarrow a$  が存在して  $g \circ f = \text{id}_a$  ,  $f \circ g = \text{id}_b$  となる。
- (2)  $a$  と  $b$  が同型 ( $a \cong b$  で表す)  $\iff$  ある同型射  $f: a \rightarrow b$  が存在する。

例 5. 圏  $\mathbf{Set}$  の同型射とは, 全単射のことである。 □

例 6. 圏  $\mathbf{Grp}$  の同型射とは, 群同型写像のことである。 □

例 7. 圏  $\mathbf{Top}$  の同型射とは, 同相写像のことである. □

命題 8.  $C, D$  を圏,  $F: C \rightarrow D$  を関手とする. このとき  $f: a \rightarrow b$  が  $C$  の同型射ならば,  $F(f): F(a) \rightarrow F(b)$  も  $D$  の同型射である.

証明.  $f: a \rightarrow b$  を同型射とする. 定義から, ある射  $g: b \rightarrow a$  が存在して  $g \circ f = \text{id}_a$  と  $f \circ g = \text{id}_b$  を満たす. これに  $F$  を適用すれば  $F(g) \circ F(f) = \text{id}_{F(a)}$ ,  $F(f) \circ F(g) = \text{id}_{F(b)}$  となる. 故に  $F(f): F(a) \rightarrow F(b)$  は同型射である. □

例 9.  $G, G'$  を群,  $U: \mathbf{Grp} \rightarrow \mathbf{Set}$  を忘却関手とするとき, 群の同型  $G \cong G'$  が成り立てば  $U(G) \cong U(G')$  である. □

例 10. 位相空間  $X$  と点  $x \in X$  の組  $\langle X, x \rangle$  を基点付き位相空間と呼ぶ. 基点付き位相空間の圏  $\mathbf{Top}_*$  を以下のように定める.

- 基点付き位相空間を対象とする.
- 射  $\langle X, x \rangle \rightarrow \langle Y, y \rangle$  は連続写像  $f: X \rightarrow Y$  であって,  $f(x) = y$  を満たすものである.
- 射の合成  $g \circ f$  は通常の写真の合成で定める.

基点付き位相空間  $\langle X, x \rangle$  に対して, 基本群 (ホモトピー群) と呼ばれる群  $\pi_1(X, x)$  が定義される. このとき連続写像  $f: X \rightarrow Y$  に対して準同型  $f_* = \pi_1(f): \pi_1(X, x) \rightarrow \pi_1(Y, f(x))$  が定まり,

$$\pi_1(g \circ f) = \pi_1(g) \circ \pi_1(f), \quad \pi_1(\text{id}_X) = \text{id}_{\pi_1(X, x)}$$

を満たすのであった. 即ち  $\pi_1: \mathbf{Top}_* \rightarrow \mathbf{Grp}$  は関手となることが分かる. よって同相写像  $f: X \rightarrow Y$  が存在すれば同型  $\pi_1(X, x) \cong \pi_1(Y, f(x))$  が成り立つ. □

$f: a \rightarrow b$  を同型射としたとき,  $g: b \rightarrow a$  で  $g \circ f = \text{id}_a$ ,  $f \circ g = \text{id}_b$  を満たすものは唯一つしかないことが容易に分かる (群において逆元が一意的なのと同じである). この  $g$  を  $f$  の逆射といい,  $f^{-1}$  で表す.

## 2 圏の例

さて, 今まで出てきた圏は全て対象が「集合に構造が入ったもの」で, 射が「写像」であった. しかし, 圏はこのようなものとは限らない. つまり, 圏の定義を満たしてさえいればよいのである.

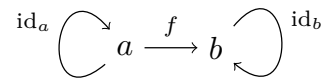
例 11.  $\text{Ob}(C) = \text{Mor}(C) := \emptyset$  とすれば, この  $C$  は明らかに圏となる. これを空圏とい  
い  $0$  で表す. □

例 12. 対象を唯一つ  $*$  だけとし, 射も恒等射  $\text{id}_*$  だけとすれば, これも明らかに圏とな  
る. これを一点圏とい  $1$  で表す.  $1$  は絵で書けば



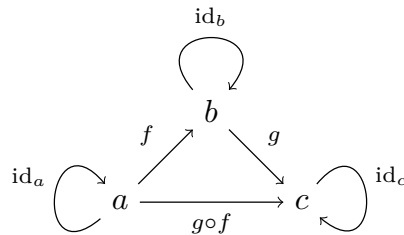
のようになる. □

例 13. 対象を二つ  $a, b$  とし, 射は恒等射  $\text{id}_a, \text{id}_b$  以外は  $f: a \rightarrow b$  唯一つだけとする.  
即ち絵で書けば



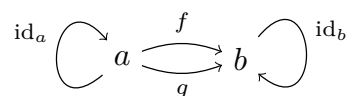
のようになる. これも圏となることが分かる. これを  $2$  で表す. □

例 14. 対象を三つ  $a, b, c$  とし, 射は恒等射  $\text{id}_a, \text{id}_b, \text{id}_c$  以外は  $f: a \rightarrow b, g: b \rightarrow c$   
と, その合成  $g \circ f: a \rightarrow c$  だけとする. 絵で書けば

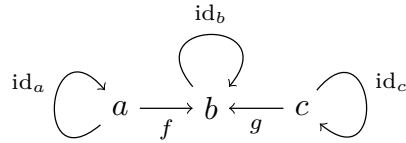


のようになる. これも圏となることが分かる. これを  $3$  で表す. □

例 15. もう最初から絵で書くことにすれば



や



も圏となる．これらの圏は記号でそれぞれ  $\Rightarrow$  や  $\cdot \rightarrow \cdot \leftarrow \cdot$  と表すことがある．  $\square$

例 16.  $M$  をモノイド<sup>\*1</sup>とする．このとき以下のように定めると  $C$  は圏になることが分かる．

- $\text{Ob}(C) := \{*\}$
- $\text{Hom}_C(*, *) := M$
- 射の合成をモノイド  $M$  の積で定める．

こうしてモノイドから対象が唯一つの圏を得ることができる．逆に対象が唯一つ  $*$  のみの圏  $C$  に対して  $M := \text{Hom}_C(*, *)$  として， $M$  の二項演算を射の合成で定義すれば，モノイドが得られる．この見方で，モノイドは対象が唯一つの圏と同一視することができる．

※ これは厳密には嘘である．というのも一般に対象が唯一つ  $*$  のみの圏  $C$  を考えたとき， $\text{Hom}_C(*, *)$  が集合となるとは限らないからである．

一般に，任意の  $c, d \in C$  に対して  $\text{Hom}_C(c, d)$  が集合となる圏を locally small な圏という．(locally small を圏の定義に入れる流儀もある．) この言葉を使えば，モノイドとは対象が唯一つの locally small な圏のこと，ということになる．ところで当サイトの PDF 内で考える圏は殆どが locally small である．そこで以後，特に断らない限り圏は locally small であるとする．

またこの見方で言えば，群とは対象が唯一つで全ての射が同型となる圏である．  $\square$

例 17.  $X$  を集合とする．このとき  $\text{Ob}(C) := X$  で射は恒等射のみとすれば， $C$  は明らかに圏となる．これを離散圏という．通常，集合はこの方法で圏とみなす．

例 18.  $\langle X, \leq \rangle$  を順序集合とする．このとき

- $\text{Ob}(C) := X$

<sup>\*1</sup> 群の定義から逆元の存在を除いたものをモノイド (monoid) という．

- $x, y \in X$  に対して  $\text{Hom}_C(x, y) = \begin{cases} \{f_{xy}\} & (x \leq y \text{ のとき}) \\ \emptyset & (\text{それ以外のとき}) \end{cases}$

と定義すると  $C$  は圏になる．それを示すため，射の合成と恒等射を定義しよう．

まず恒等射であるが， $x \in X$  に対して  $x \leq x$  だから，定義より射  $x \rightarrow x$  は唯一つ存在し，それは  $f_{xx}$  である．よって  $\text{id}_x := f_{xx}$  と定義するしかない．

次に合成を定義するため， $f: x \rightarrow y$  と  $g: y \rightarrow z$  を射とする．定義から，射が存在するためには  $x \leq y, y \leq z$  でなければならない．また勿論  $f = f_{xy}, g = f_{yz}$  である．このとき  $x \leq z$  だから  $x$  から  $z$  への射は唯一つ  $f_{xz}: x \rightarrow z$  が存在する．そこで  $f_{yz} \circ f_{xy} := f_{xz}$  と定義する．

この定義が圏の条件を満たすことは容易に分かる．こうして順序集合は圏とみなすことができる．

逆に圏  $C$  が次を満たすとする．

- $\text{Ob}(C)$  は集合である．
- $x, y \in C$  に対して  $|\text{Hom}_C(x, y)| \leq 1$

このとき集合  $X := \text{Ob}(C)$  に二項関係  $R$  を

$$xRy \iff |\text{Hom}_C(x, y)| = 1$$

で定めれば， $(X, R)$  は前順序集合\*2になる．前順序集合は順序集合と同じやり方で圏と見なせるから，前順序集合を「 $\text{Ob}(C)$  が集合で， $|\text{Hom}_C(x, y)| \leq 1$  となる圏」と同一視することができる．□

例 19. 通常，集合論では自然数  $n$  を  $n := \{0, 1, \dots, n-1\}$  により定義する．通常の場合によって順序を入れれば， $n$  は順序集合となる．従って，例 18 の方法により  $n$  を圏と見なすことができる．特に  $0, 1, 2, 3$  は圏である．これらは既に述べた圏  $0, 1, 2, 3$  と一致する．□

例 20. 実は「圏と関手」も圏をなす．つまり，

- 圏を対象とする．
- 圏  $C$  から圏  $D$  への射とは関手  $C \rightarrow D$  のこととする．

---

\*2 反射律と推移律を満たすもの（つまり順序の定義から反対称律を除いたもの）を前順序 (preorder) という．



- 関手  $F: C \rightarrow D, G: D \rightarrow E$  に対して合成関手  $G \circ F: C \rightarrow E$  を次で定義する。(  $G \circ F$  を単に  $GF$  と書くことも多い.)
  - $a \in C$  に対して  $G \circ F(a) := G(F(a))$ .
  - $C$  の射  $f: a \rightarrow b$  に対して  $G \circ F(f) := G(F(f))$ .
- 圏  $C$  に対して恒等射  $\text{id}_C: C \rightarrow C$  を次で定義する。(  $\text{id}_C$  を恒等関手と呼ぶ.)
  - $a \in C$  に対して  $\text{id}_C(a) := a$ .
  - $C$  の射  $f: a \rightarrow b$  に対して  $\text{id}_C(f) := f$ .

と定義すると、これは圏となることが分かる\*3。この圏を  $\text{Cat}$  と書く。

### 3 関手の例

圏の例をいろいろ見たので、今度は関手の例を見てみよう。

例 21.  $X, Y$  を集合,  $f: X \rightarrow Y$  を写像とする。  $F(X) := \mathcal{P}(X)$  を冪集合として,  $Ff: \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{P}(Y)$  を「像」で定める。即ち,  $S \subset X$  に対して  $Ff(S) := \{f(a) \mid a \in S\}$  である。これにより  $F: \text{Set} \rightarrow \text{Set}$  は関手となる。  $\square$

例 22. 集合  $X, Y$  を離散圏と見なす。このとき,  $X$  の射は恒等射しかないから, 関手  $X \rightarrow Y$  は写像  $X \rightarrow Y$  と同一視することができる。  $\square$

例 23. 順序集合  $(X, \leq_X), (Y, \leq_Y)$  を圏とみなし, 関手  $F: (X, \leq_X) \rightarrow (Y, \leq_Y)$  を考える。このとき  $a, b \in X$  に対して  $a \leq_X b \implies Fa \leq_Y Fb$  が成り立つ。

∴  $a \leq_X b$  とする。このとき射  $f: a \rightarrow b$  が存在する。よって  $Ff: Fa \rightarrow Fb$  である。即ち  $Fa \leq_Y Fb$  でなければならない。

よってこの場合, 関手とは順序を保つ写像のことである。  $\square$

例 24. モノイド  $M, N$  を圏とみなすとき, 関手  $M \rightarrow N$  とはモノイド準同型のことである。  $\square$

例 25. モノイド  $M$  を圏とみなしたものを  $C$  とする。関手  $F: C \rightarrow \text{Set}$  を考え

\*3 「全ての集合の集まり」を集合だとみなすと矛盾してしまうように、「全ての圏の集まり」を圏とみなすのも、集合論的に危ない所があり、厳密には気をつけて扱わないと矛盾してしまう。ただ、特に必要がなければ、圏論をやる時にそういう集合論の技術的なことを気にしてもしょうがないと思うので、このサイトの圏論の PDF では基本的にそういうことにはあまり気を配らないことにする。

る． $C$  の対象は一つだけなのでそれを  $*$  とする．このとき  $X := F(*)$  は集合である． $\text{Hom}_C(*, *) = M$  だから， $m \in M$  に対して  $Fm: X = F(*) \rightarrow F(*) = X$  は写像である． $x \in X$  に対して  $mx := Fm(x)$  と書くことにする．今  $F$  は関手だから， $m, n \in M$  に対して  $F(mn) = Fm \circ Fn$  である．故に

$$(mn)x = F(mn)(x) = (Fm \circ Fn)(x) = Fm(Fn(x)) = m(nx)$$

となる．また単位元  $e \in M$  に対して  $Fe = \text{id}_{F(*)} = \text{id}_X$  だから  $ex = Fe(x) = \text{id}_X(x) = x$  である．

以上により，演算  $M \times X \ni (m, x) \mapsto mx \in X$  によりモノイド  $M$  は集合  $X$  に左から作用している．逆に，モノイド  $M$  が集合  $X$  に左から作用していれば，関手  $F: C \rightarrow \text{Set}$  を定めることが分かる．こうして関手  $F: C \rightarrow \text{Set}$  を左  $M$ -集合  $X$  と同一視することができる． $\square$

位相空間  $X$  に対して  $F(X)$  で「 $X$  上の複素数値連続関数全体がなす集合」を表すことにする．このとき，連続写像  $f: X \rightarrow Y$  に対して写像  $Ff: F(Y) \rightarrow F(X)$  が， $g \in F(Y)$  に対して  $Ff(g) := g \circ f$  で定義できる．

$$\begin{array}{ccc} F(Y) & \xrightarrow{Ff} & F(X) \\ \Downarrow & & \Downarrow \\ (Y \xrightarrow{g} \mathbb{C}) & \longmapsto & (X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} \mathbb{C}) \end{array}$$

この  $F$  は関手にはならない．というのも， $f: X \rightarrow Y$  に対して  $Ff: F(Y) \rightarrow F(X)$  と，射の向きが逆になっているからである．ただ，逆向きになることを除くと，関手と似たような条件を満たしている．即ち

- $f: X \rightarrow Y$ ， $g: Y \rightarrow Z$  に対して  $F(g \circ f) = F(f) \circ F(g)$ ．
- $F(\text{id}_X) = \text{id}_{F(X)}$ ．

このような逆向きになる「関手」を反変関手という．ちゃんと定義すると次のようになる．

定義． $C, D$  を圏とする． $C$  から  $D$  への反変関手 (contravariant functor)  $F: C \rightarrow D$  とは  $a \in \text{Ob}(C)$  に  $F(a) \in \text{Ob}(D)$  を， $f \in \text{Mor}(C)$  に  $F(f) \in \text{Mor}(D)$  を対応させる関数であって，以下を満たすものである．

- (1)  $f: a \rightarrow b$  のとき  $F(f): F(b) \rightarrow F(a)$  である．

(2)  $\text{cod}(f) = \text{dom}(g)$  のとき  $F(g \circ f) = F(f) \circ F(g)$  .

(3)  $F(\text{id}_a) = \text{id}_{F(a)}$  .

反変関手に対して、通常関手を共変関手 (covariant functor) と呼ぶ。

例 26. 上で定義した  $F: \mathbf{Top} \rightarrow \mathbf{Set}$  は反変関手である。 □

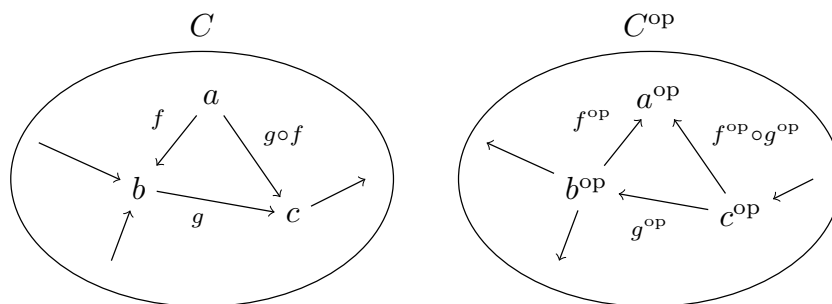
例 27.  $X, Y$  を集合,  $f: X \rightarrow Y$  を写像とする。  $F(X) := \mathcal{P}(X)$  を冪集合として,  $Ff: \mathcal{P}(Y) \rightarrow \mathcal{P}(X)$  を「逆像」で定める。即ち,  $S \subset Y$  に対して  $Ff(S) := f^{-1}(S) = \{a \in X \mid f(a) \in S\}$  である。これにより  $F: \mathbf{Set} \rightarrow \mathbf{Set}$  は反変関手となる。 □

このように圏論には「共変関手」と「反変関手」の二つがあるのだが、実はこの二つの違いを意識する必要はあまりない。というのも、反変関手は共変関手と見なせるからである。

定義.  $C$  を圏とする。このとき  $C^{\text{op}}$  を以下のように定める。

- 対象  $a \in C$  に対して新しい対象  $a^{\text{op}}$  を用意し,  $\text{Ob}(C^{\text{op}}) := \{a^{\text{op}} \mid a \in \text{Ob}(C)\}$  と定める。
- 射  $f \in C$  に対して新しい射  $f^{\text{op}}$  を用意し,  $\text{Mor}(C^{\text{op}}) := \{f^{\text{op}} \mid f \in \text{Mor}(C)\}$  と定める。
- $\text{dom}(f^{\text{op}}) := \text{cod}(f)^{\text{op}}$ ,  $\text{cod}(f^{\text{op}}) := \text{dom}(f)^{\text{op}}$  と定める。即ち  $f: a \rightarrow b$  のとき  $f^{\text{op}}: b^{\text{op}} \rightarrow a^{\text{op}}$  である。
- $f^{\text{op}}: a^{\text{op}} \rightarrow b^{\text{op}}$ ,  $g^{\text{op}}: b^{\text{op}} \rightarrow c^{\text{op}}$  に対して射の合成  $g^{\text{op}} \circ f^{\text{op}}: a^{\text{op}} \rightarrow c^{\text{op}}$  を  $g^{\text{op}} \circ f^{\text{op}} := (f \circ g)^{\text{op}}$  で定める。
- $\text{id}_{a^{\text{op}}} := \text{id}_a^{\text{op}}$  とする。

この  $C^{\text{op}}$  が圏の定義を満たすことは容易に分かる。これを圏  $C$  の双対圏, 反転圏 (opposite category) などと呼ぶ。絵で書けば、次のように射の向きを全て反対にした圏である。



通常は,  $a^{\text{op}}, f^{\text{op}}$  などと一々書かず,  $a^{\text{op}}$  を単に  $a$ ,  $f^{\text{op}}$  を単に  $f$  と表す.

この  $C^{\text{op}}$  を使えば, 反変関手  $C \rightarrow D$  とは共変関手  $C^{\text{op}} \rightarrow D$  のことである. なので以降, 反変関手という言葉は使わず, また共変関手を単に関手と呼ぶ.

例 28.  $X$  を離散圏とすれば  $X^{\text{op}} = X$  である. □

例 29. 順序集合  $(X, \leq)$  を圏とみなして  $C$  と書くと  $C^{\text{op}}$  は順序集合  $(X, \geq)$  である. □

例 30. 群  $G$  を圏とみなした時,  $G^{\text{op}}$  は逆転群である. □

例 31. モノイド  $M$  を圏とみなした時, 関手  $M \rightarrow \text{Set}$  を左  $M$ -集合と同一視したのと同様にして, 関手  $M^{\text{op}} \rightarrow \text{Set}$  を右  $M$ -集合と同一視することができる. □

例 32.  $F: C \rightarrow D$  を関手とするとき, 関手  $F^{\text{op}}: C^{\text{op}} \rightarrow D^{\text{op}}$  が以下のようにして定まる.

- $x^{\text{op}} \in \text{Ob}(C^{\text{op}})$  に対して  $F^{\text{op}}(x^{\text{op}}) := F(x)^{\text{op}}$ .
- $f^{\text{op}} \in \text{Mor}(C^{\text{op}})$  に対して  $F^{\text{op}}(f^{\text{op}}) := F(f)^{\text{op}}$ .

関手  $F^{\text{op}}$  を単に  $F$  と書くことも多い. □