

自然変換・関手圏

alg-d

http://alg-d.com/math/kan_extension/

2018年8月9日

目次

1	自然変換の計算	1
2	関手圏	6

1 自然変換の計算

圏論で一番 (かどうかは分からないけど) 重要なのは自然変換である。圏論を学ぶには、自然変換の様々な「計算」を行う必要がある。ここではまず、その「計算」について説明する。

C, D を圏, $F, G: C \rightarrow D$ を関手, $\theta: F \Rightarrow G$ を自然変換とする。このとき、図式では次のように表す。

$$\begin{array}{ccc} & F & \\ C & \begin{array}{c} \curvearrowright \\ \theta \Downarrow \\ \curvearrowleft \end{array} & D \\ & G & \end{array}$$

さて、更に $H: C \rightarrow D$ を関手として $\sigma: G \Rightarrow H$ も自然変換とする。図式で書くと次のような状況となる。

$$\begin{array}{ccc} & F & \\ C & \begin{array}{c} \curvearrowright \\ \theta \Downarrow \\ \sigma \Downarrow \\ \curvearrowleft \end{array} & D \\ & G & \\ & H & \end{array}$$

このとき、この自然変換 θ, σ を合成して新しい自然変換 $\sigma \circ \theta: F \Rightarrow H$ を得ることができる。

$$\begin{array}{ccc}
 & F & \\
 C & \begin{array}{c} \curvearrowright \\ \sigma \circ \theta \\ \curvearrowleft \end{array} & D \\
 & H &
 \end{array}$$

その為には $a \in C$ に対して $(\sigma \circ \theta)_a := \sigma_a \circ \theta_a$ と定義すればよい。この定義により $\sigma \circ \theta$ が自然変換となることを示そう。その為には C の射 $f: a \rightarrow b$ に対して

$$\begin{array}{ccc}
 Fa & \xrightarrow{(\sigma \circ \theta)_a} & Ha \\
 Ff \downarrow & & \downarrow Hf \\
 Fb & \xrightarrow{(\sigma \circ \theta)_b} & Hb
 \end{array}$$

が可換となることを示せばよい。定義より、この図式は次のように書き換えられる。

$$\begin{array}{ccccc}
 Fa & \xrightarrow{\theta_a} & Ga & \xrightarrow{\sigma_a} & Ha \\
 Ff \downarrow & & \downarrow Gf & & \downarrow Hf \\
 Fb & \xrightarrow{\theta_b} & Gb & \xrightarrow{\sigma_b} & Hb
 \end{array}$$

θ, σ は自然変換だから、この小さい四角は可換となる。故に全体も可換となり、 $\sigma \circ \theta$ が自然変換であることが分かった。

この $\sigma \circ \theta$ を θ と σ の垂直合成と呼ぶ。

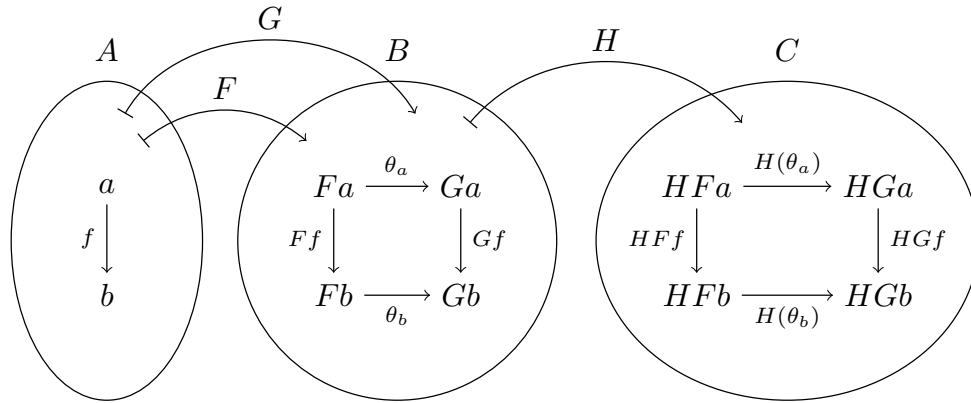
さて次に A, B, C を圏、 $F, G: A \rightarrow B$ と $H: B \rightarrow C$ を関手、 $\theta: F \Rightarrow G$ を自然変換とする。即ち次の図式のような状況である。

$$\begin{array}{ccccc}
 & F & & & \\
 A & \begin{array}{c} \curvearrowright \\ \theta \\ \curvearrowleft \end{array} & B & \xrightarrow{H} & C \\
 & G & & &
 \end{array}$$

このとき H と θ を使って新しい自然変換 $H\theta: HF \Rightarrow HG$ を定義することができる。

$$\begin{array}{ccccc}
 & F & & H & \\
 A & \begin{array}{c} \curvearrowright \\ \downarrow H\theta \\ \curvearrowleft \end{array} & B & \begin{array}{c} \curvearrowright \\ \\ \curvearrowleft \end{array} & C \\
 & G & & H &
 \end{array}$$

その為には $a \in A$ に対して $(H\theta)_a := H(\theta_a)$ と定義すればよい. ここで $\theta_a: Fa \rightarrow Ga$ だから $(H\theta)_a: HFa \rightarrow HGa$ である. 絵で描けば次のようになる.



この定義により $H\theta$ が自然変換となることを示すためには, $f: a \rightarrow b$ に対して

$$\begin{array}{ccc} HFa & \xrightarrow{(H\theta)_a} & HGa \\ HFf \downarrow & & \downarrow HGF \\ HFb & \xrightarrow{(H\theta)_b} & HGb \end{array}$$

が可換であることを示せばよいが, それは上の絵から明らかであろう.

今度は A, B, C を圏, $F: A \rightarrow B$ と $G, H: B \rightarrow C$ を関手, $\theta: G \Rightarrow H$ を自然変換とする. 即ち次の図式の状況である.

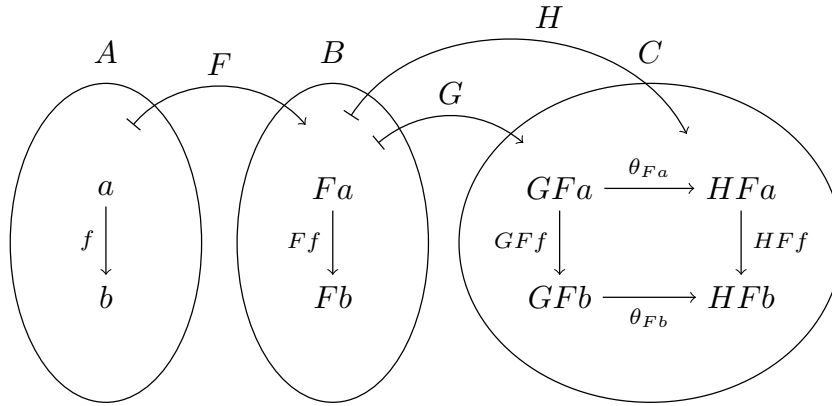
$$A \xrightarrow{F} B \begin{array}{c} \xrightarrow{G} \\ \Downarrow \theta \\ \xrightarrow{H} \end{array} C$$

このとき F と θ を使って新しい自然変換 $\theta_F: GF \Rightarrow HF$ を定義することができる.

$$A \begin{array}{c} \xrightarrow{F} \\ \searrow \\ \xrightarrow{F} \end{array} B \begin{array}{c} \xrightarrow{G} \\ \Downarrow \theta_F \\ \xrightarrow{H} \end{array} C$$

その為には $a \in A$ に対して $(\theta_F)_a := \theta_{Fa}$ と定義すればよい. 絵で描けば次のように

なる.



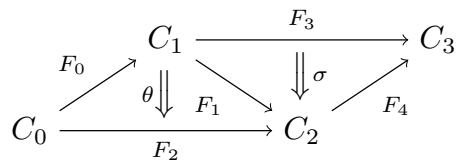
この定義により θ_F が自然変換になることを示すためには、 $f: a \rightarrow b$ に対して

$$\begin{array}{ccc}
 GFa & \xrightarrow{(\theta_F)_a} & HFa \\
 GFf \downarrow & & \downarrow HFf \\
 GFb & \xrightarrow{(\theta_F)_b} & HFb
 \end{array}$$

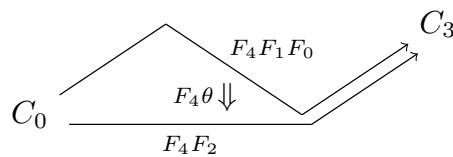
が可換であることを示せばよいが、それは上の絵から明らかであろう。

これらを使うと、様々な自然変換を合成することができるようになる。

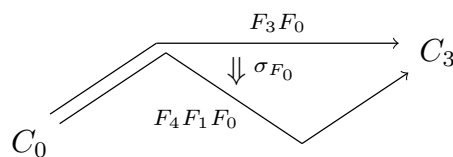
例 1. 次の $\theta: F_1F_0 \Rightarrow F_2$ と $\sigma: F_3 \Rightarrow F_4F_1$ を合成する。



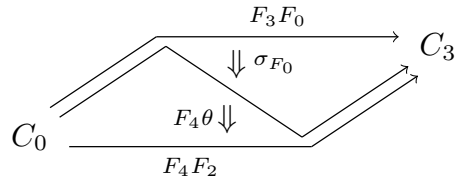
まず θ と F_4 から自然変換 $F_4\theta$ を得る。



次に σ と F_0 から自然変換 σ_{F_0} を得る。

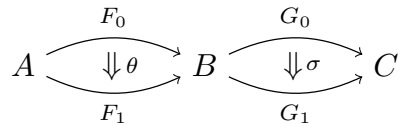


これらを垂直合成して

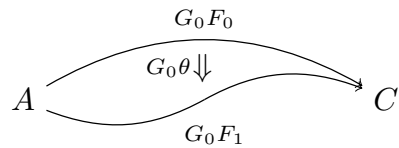


自然変換 $F_4\theta \circ \sigma_{F_0}: F_3F_0 \Rightarrow F_4F_2$ が得られた。 □

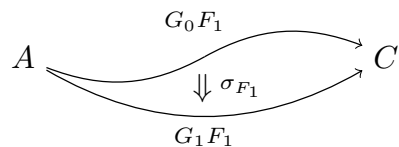
例 2. 次の自然変換 θ と σ を合成する.



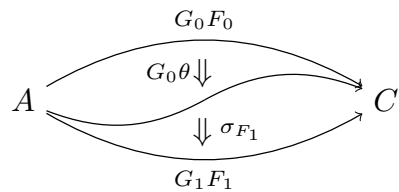
まず θ と G_0 から自然変換 $G_0\theta$ を得る.



次に σ と F_1 から自然変換 σ_{F_1} を得る.



これにより垂直合成 $\sigma_{F_1} \circ G_0\theta: G_0F_0 \Rightarrow G_1F_1$ を考えることができる.



この合成を θ と σ の水平合成と呼ぶ.

この水平合成について、今は $\sigma_{F_1} \circ G_0\theta$ を考えたが、 $G_1\theta \circ \sigma_{F_0}$ を考えることもできる。

$$\begin{array}{ccc}
 & G_0F_0 & \\
 & \downarrow \sigma_{F_0} & \\
 A & \xrightarrow{\quad} & C \\
 & \downarrow G_1\theta & \\
 & G_1F_1 &
 \end{array}$$

実はこの二つの合成は一致する。即ち $a \in A$ に対して $(\sigma_{F_1} \circ G_0\theta)_a = (G_1\theta \circ \sigma_{F_0})_a$ が成り立つ。その為には $\sigma_{F_1a} \circ G_0\theta_a = G_1\theta_a \circ \sigma_{F_0a}$ を示せばよいが、それは射 $\theta_a: F_0a \rightarrow F_1a$ について $\sigma: G_0 \Rightarrow G_1$ の自然性から

$$\begin{array}{ccccc}
 F_0a & & G_0F_0a & \xrightarrow{\sigma_{F_0a}} & G_1F_0a \\
 \theta_a \downarrow & & G_0\theta_a \downarrow & & \downarrow G_1\theta_a \\
 F_1a & & G_0F_1a & \xrightarrow{\sigma_{F_1a}} & G_1F_1a
 \end{array}$$

が可換となることにより従う。 □

2 関手圏

上で自然変換が合成できることを見た。合成できるという事は、関手を対象、自然変換を射とすれば圏になるということである。実際、 C, D を圏とするととき D^C を

- $\text{Ob}(D^C)$ を C から D への関手全体とする。
- $F, G \in \text{Ob}(D^C)$ に対して、自然変換 $F \Rightarrow G$ を F から G への射とする。
- 射の合成は垂直合成とする。
- $F \in \text{Ob}(D^C)$ に対して、自然変換 $\text{id}_F: F \Rightarrow F$ を $(\text{id}_F)_a := \text{id}_{F_a}$ で定める。この id_F を恒等変換と呼ぶ。

で定義すれば、 D^C は圏となる*¹。

それを示すため、まずは結合律を示す。 $E, F, G, H: C \rightarrow D$ を関手として、 $\theta: E \Rightarrow F$, $\sigma: F \Rightarrow G$, $\tau: G \Rightarrow H$ を自然変換とする。 $(\tau \circ \sigma) \circ \theta = \tau \circ (\sigma \circ \theta)$ を示す。即ち、 $a \in C$ に対して $((\tau \circ \sigma) \circ \theta)_a = (\tau \circ (\sigma \circ \theta))_a$ を示せばよい。定義から $(\tau_a \circ \sigma_a) \circ \theta_a = \tau_a \circ (\sigma_a \circ \theta_a)$ を示せばよいが、これは D が圏だから成り立つ。

*¹ D^C を $[C, D]$ と書くこともある。

後は $\theta \circ \text{id}_E = \theta$ と $\text{id}_F \circ \theta = \theta$ を示せばよい. それには $\theta_a \circ \text{id}_{Ea} = \theta_a$, $\text{id}_{Fa} \circ \theta_a = \theta_a$ を示せばよいが, これは D が圏だから成り立つ.

以上により D^C は圏となる. これを関手圏 (functor category) と呼ぶ.

例 3. 圏 C に対して $C^0 = \mathbf{1}$, $C^1 = C$ である. □

例 4. モノイド M を圏とみなしたとき, 関手 $F: M \rightarrow \mathbf{Set}$ は左 M -集合と同一視できた. また関手 $F, G: M \rightarrow \mathbf{Set}$ に対して, 自然変換 $\theta: F \Rightarrow G$ は準同型写像と同一視できた. 故に関手圏 \mathbf{Set}^M は左 M -集合と準同型がなす圏となる. □

例 5. C を圏, X を離散圏 $\{a, b\}$ とすれば圏の同型 $C^X = C \times C$ が成り立つ. □

例 6. C を圏とするとき, 関手 $C^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Set}$ を C 上の前層というのであった (「例: 位相空間上の層」の PDF を参照). $P, Q: C^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Set}$ を前層とするとき, 自然変換 $\theta: P \Rightarrow Q$ を前層 P から前層 Q への射という. よって $\mathbf{Set}^{C^{\text{op}}}$ が C 上の前層がなす圏となる. □

D^C は圏だから, この圏において同型を考えることができる.

命題 7. 自然変換 θ が圏 D^C における同型射 $\iff \theta$ が自然同型

証明. (\implies) 自然変換 $\theta: F \Rightarrow G$ が同型射であるとすると同型射の定義より, ある自然変換 $\sigma: G \Rightarrow F$ が存在して $\sigma \circ \theta = \text{id}_F$, $\theta \circ \sigma = \text{id}_G$ となる. 従って, 任意の $a \in C$ に対して $\sigma_a \circ \theta_a = \text{id}_{Fa}$, $\theta_a \circ \sigma_a = \text{id}_{Ga}$ が成り立つ. 即ち, 各 θ_a が同型射となるから θ は自然同型である.

(\impliedby) $\theta: F \Rightarrow G$ が自然同型であるとする. 自然同型の定義より, 各対象 $a \in C$ に対して $\theta_a: Fa \rightarrow Ga$ は圏 D における同型射である. 故に D のある射 $\sigma_a: Ga \rightarrow Fa$ が存在して $\sigma_a \circ \theta_a = \text{id}_{Fa}$, $\theta_a \circ \sigma_a = \text{id}_{Ga}$ となる. このとき $\sigma = \{\sigma_a\}_{a \in C}$ は自然変換である.

∴) C の任意の射 $f: a \rightarrow b$ に対して次が可換であることを示せばよい.

$$\begin{array}{ccc} Ga & \xrightarrow{\sigma_a} & Fa \\ Gf \downarrow & & \downarrow Ff \\ Gb & \xrightarrow{\sigma_b} & Fb \end{array}$$

そのために次の図式を考える.

$$\begin{array}{ccc}
 Ga & \xrightarrow{\sigma_a} & Fa \\
 \text{id} \downarrow & & \downarrow \text{id} \\
 Ga & \xleftarrow{\theta_a} & Fa \\
 Gf \downarrow & & \downarrow Ff \\
 Gb & \xleftarrow{\theta_b} & Fb \\
 \text{id} \downarrow & & \downarrow \text{id} \\
 Gb & \xrightarrow{\sigma_b} & Fb
 \end{array}$$

上の四角と下の四角は、 σ_a, σ_b の定義より可換である. 真ん中の四角は θ が自然変換であることから可換である. よって一番外側の大きな四角も可換であり, $Ff \circ \sigma_a = \sigma_b \circ Gf$ が分かった.

垂直合成の定義から明らかに $\sigma \circ \theta = \text{id}_F, \theta \circ \sigma = \text{id}_G$ だから θ は同型射である. \square

さて, 関手圏と関連して定義される関手がいくつか存在するのでそれを説明しよう.

まず $F: C \rightarrow D$ を関手とする. このとき圏 M に対して $F: \text{Ob}(C^M) \rightarrow \text{Ob}(D^M)$ が $F(G) := FG$ で定義できる.

$$M \xrightarrow{G} C \quad \xrightarrow{F} \quad M \xrightarrow{G} C \xrightarrow{F} D$$

実はこれは関手となる. それには $\theta: G \Rightarrow H: M \rightarrow C$ に対して $F(\theta) := F\theta$ で定義すればよい.

$$\begin{array}{ccc}
 M \begin{array}{c} \xrightarrow{G} \\ \Downarrow \theta \\ \xrightarrow{H} \end{array} C & \xrightarrow{F} & M \begin{array}{c} \xrightarrow{G} C \xrightarrow{F} D \\ \Downarrow F\theta \\ \xrightarrow{H} C \xrightarrow{F} D \end{array}
 \end{array}$$

この F が関手になることを示そう.

まず $\theta: G \Rightarrow H, \sigma: H \Rightarrow K$ を自然変換として $F(\sigma \circ \theta) = F(\sigma) \circ F(\theta)$ を示す. その為には $a \in C$ に対して $(F(\sigma \circ \theta))_a = (F(\sigma) \circ F(\theta))_a$ を示せばよい. 定義より

$$\begin{aligned}
 (F(\sigma \circ \theta))_a &= F((\sigma \circ \theta)_a) = F(\sigma_a \circ \theta_a) = F(\sigma_a) \circ F(\theta_a) \\
 (F(\sigma) \circ F(\theta))_a &= (F(\sigma))_a \circ (F(\theta))_a = F(\sigma_a) \circ F(\theta_a)
 \end{aligned}$$

となるから成り立つ.

次に $F(\text{id}_G) = \text{id}_{FG}$ を示す. その為には $a \in C$ に対して $(F(\text{id}_G))_a = (\text{id}_{FG})_a$ を示せばよい. 定義より

$$\begin{aligned} (F(\text{id}_G))_a &= F((\text{id}_G)_a) = F(\text{id}_{Ga}) = \text{id}_{FGa} \\ (\text{id}_{FG})_a &= \text{id}_{FGa} \end{aligned}$$

となるから成り立つ. 以上により $F: C^M \rightarrow D^M$ は関手である.

同じようにして, 圏 M に対して $F^{-1}: \text{Ob}(M^D) \rightarrow \text{Ob}(M^C)$ が $F^{-1}(G) := GF$ で定義できる. これも関手となる. それには $\theta: G \Rightarrow H: D \rightarrow M$ に対して $F^{-1}(\theta) := \theta_F$ で定義すればよい.

$$\begin{array}{ccc} & & \xrightarrow{F^{-1}} \\ D \begin{array}{c} \xrightarrow{G} \\ \Downarrow \theta \\ \xrightarrow{H} \end{array} & M & \\ & & \xrightarrow{F} \\ C \begin{array}{c} \xrightarrow{F} \\ \Downarrow \theta_F \\ \xrightarrow{F} \end{array} & D \begin{array}{c} \xrightarrow{G} \\ \Downarrow \theta_F \\ \xrightarrow{H} \end{array} & M \end{array}$$

証明は先ほどと同じような感じなので省略する.

例 8. C, D を圏とすると一意に定まる関手 $!: C \rightarrow \mathbf{1}$ より関手 $!^{-1}: D = D^{\mathbf{1}} \rightarrow D^C$ が定まる. これを対角関手といい Δ で表す. 定義より

- $a \in D$ に対して Δa は以下で与えられる関手 $\Delta a: C \rightarrow D$ である.
 - $c \in C$ に対して $\Delta a(c) = a$.
 - $f \in \text{Mor}(C)$ に対して $\Delta a(f) = \text{id}_a$.
- $f: a \rightarrow b$ に対して Δf は「 $c \in C$ に対して $(\Delta f)_c = f$ 」で与えられる自然変換 $\Delta f: \Delta a \Rightarrow \Delta b$ である.

である. □

例 9. C, D を圏として $a \in C$ を対象とする. 関手 $F: \mathbf{1} \rightarrow C$ を $F(*) := a$ で定めれば関手 $F^{-1}: D^C \rightarrow D^{\mathbf{1}} = D$ が得られる. この関手を ev_a と書く. 定義より

- $G \in D^C$ に対して $\text{ev}_a(G) := Ga$.
- $\theta \in \text{Mor}(D^C)$ に対して $\text{ev}_a(\theta) = \theta_a$

である.

更に, ev_a の a の部分も変数にすることができる. 即ち, ev を

- $F \in D^C$, $a \in C$ に対して $\text{ev}(F, a) := Fa$ とする.
- $\theta: F \Rightarrow G$ を自然変換, $f: a \rightarrow b$ を C の射とすると $\text{ev}(\theta, f) := \theta_b \circ Ff$ とする.

により定めれば, 関手 $\text{ev}: D^C \times C \rightarrow D$ となる. □

例 10. $\mathbf{2} = \{0 < 1\}$ だった. 圏 C に対して関手 $\mathbf{2} \rightarrow C$ は, C の射と一対一に対応する. つまり $\text{Ob}(C^{\mathbf{2}}) = \text{Mor}(C)$ とみなすことができる. $C^{\mathbf{2}}$ を圏 C の arrow category と呼ぶ. $f: a \rightarrow b$, $g: c \rightarrow d$ を C の射とすると, $C^{\mathbf{2}}$ における f から g への射とは, 射の組 $\langle h: a \rightarrow c, k: b \rightarrow d \rangle$ であって

$$\begin{array}{ccc} a & \xrightarrow{h} & c \\ f \downarrow & & \downarrow g \\ b & \xrightarrow{k} & d \end{array}$$

を可換にするものである.

関手 $\mathbf{1} = \{*\} \rightarrow \mathbf{2}$ は 2 つあり, $F(*) := 0$ で定まる F と $G(*) := 1$ で定まる G の 2 つである. これらから 2 つの関手 $F^{-1}, G^{-1}: C^{\mathbf{2}} \rightarrow C$ が定まる. 定義より, F^{-1} は $f \in \text{Ob}(C^{\mathbf{2}}) = \text{Mor}(C)$ に対して $\text{dom}(f)$ を対応させる関手であり, G^{-1} は f に対して $\text{cod}(f)$ を対応させる関手である. また例 8 で定義した対角関手 $\Delta: C \rightarrow C^{\mathbf{2}}$ は $c \in C$ に対して $\text{id}_c \in \text{Mor}(C) = \text{Ob}(C^{\mathbf{2}})$ を対応させる関手である. □

例 11. 集合 X を離散圏とみなして関手圏 $\mathbf{2}^X$ を考える. この場合, 関手 $X \rightarrow \mathbf{2}$ とは写像 $X \rightarrow \{0, 1\}$ のことだから $\text{Ob}(\mathbf{2}^X) = \mathcal{P}(X)$ (X の冪集合) と見なすことができる. 即ち写像 $F: \mathcal{P}(X) \ni A \mapsto \chi_A \in \text{Ob}(\mathbf{2}^X)$ は全単射である (但し χ_A は $A \subset X$ の特性関数). $\mathcal{P}(X)$ は包含関係で順序集合, 即ち圏となるが, このとき F は圏同型 $F: \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathbf{2}^X$ を与えることが容易に分かる. つまり圏として $\mathbf{2}^X = \mathcal{P}(X)$ と思ってよい.

X, Y を集合として $f: X \rightarrow Y$ を写像とする. X, Y を離散圏とみなしたとき $f: X \rightarrow Y$ は関手である. よって関手 $f^{-1}: \mathbf{2}^Y \rightarrow \mathbf{2}^X$ が得られる. 上記の圏同型により f^{-1} は関手 $\mathcal{P}(Y) \rightarrow \mathcal{P}(X)$ と見なせるが, この関手は $A \subset Y$ の逆像 $f^{-1}(A) \subset X$ を対応させる関手である. □

$T: A \times B \rightarrow C$ を関手とする. このとき $a \in A$ に対して F を

- 対象 $b \in B$ に対して $F(b) := T(a, b)$.
- 射 $f \in B$ に対して $F(f) := T(\text{id}_a, f)$.

と定義すれば, 明らかに F は関手 $F: B \rightarrow C$ となる. この関手を $T(a, -)$ で表す. 同様に $b \in B$ に対して関手 $T(-, b): A \rightarrow C$ も定義できる.

このとき対応 $a \mapsto T(a, -)$ は関手 $\tilde{T}: A \rightarrow C^B$ を定める. それを示すため, A の射 $f: a \rightarrow a'$ に対して自然変換 $\tilde{T}(f): \tilde{T}(a) \Rightarrow \tilde{T}(a')$ を定義しよう. その為に $b \in B$ に対して $\tilde{T}(f)_b := T(f, \text{id}_b)$ と定義する. この $\tilde{T}(f)_b$ は $b \in B$ について自然である.

\therefore) B の射 $g: b \rightarrow b'$ に対して

$$\begin{array}{ccc} \tilde{T}(a)(b) & \xrightarrow{\tilde{T}(f)_b} & \tilde{T}(a')(b) \\ \tilde{T}(a)(g) \downarrow & & \downarrow \tilde{T}(a')(g) \\ \tilde{T}(a)(b') & \xrightarrow{\tilde{T}(f)_{b'}} & \tilde{T}(a')(b') \end{array}$$

が可換であることを示せばよい. 定義により, この図式は

$$\begin{array}{ccc} T(a, b) & \xrightarrow{T(f, \text{id}_b)} & T(a', b) \\ T(\text{id}_a, g) \downarrow & & \downarrow T(\text{id}_{a'}, g) \\ T(a, b') & \xrightarrow{T(f, \text{id}_{b'})} & T(a', b') \end{array}$$

となるが, これは $T(\text{id}_{a'}, g) \circ T(f, \text{id}_b) = T(f, g) = T(f, \text{id}_{b'}) \circ T(\text{id}_a, g)$ となり可換である.

この $\tilde{T}(f)$ は明らかに $\tilde{T}(g \circ f) = \tilde{T}(g) \circ \tilde{T}(f)$, $\tilde{T}(\text{id}) = \text{id}$ を満たすから $\tilde{T}: A \rightarrow C^B$ は関手である.

逆に, 関手 $\tilde{T}: A \rightarrow C^B$ が与えられたとき $T: A \times B \rightarrow C$ を $T(a, b) := \tilde{T}(a)(b)$ で定義することができる. この対応は全単射

$$\text{Hom}_{\text{Cat}}(A \times B, C) \cong \text{Hom}_{\text{Cat}}(A, C^B)$$

を与えることが分かる.