

第 1 章

∞ -圏

この付録では, [?], [?], [?] に従って ∞ -圏^{*1}, および主 ∞ -束を導入する.

1.1 圏論の復習

1.1.1 圏と関手

定義 1.1: 圏

圏 (category) \mathcal{C} とは, 以下の 4 種類のデータからなる:

- 対象 (object) と呼ばれる要素の集まり^a

$$\mathrm{Ob}(\mathcal{C})$$

- $\forall A, B \in \mathrm{Ob}(\mathcal{C})$ に対して, A から B への射 (morphism) と呼ばれる要素の集合

$$\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, B)$$

- $\forall A \in \mathrm{Ob}(\mathcal{C})$ に対して, A 上の恒等射 (identity morphism) と呼ばれる射

$$\mathrm{Id}_A \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, A)$$

- $\forall A, B, C \in \mathrm{Ob}(\mathcal{C})$ と $\forall f \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, B), \forall g \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(B, C)$ に対して, f と g の合成 (composite) と呼ばれる射 $g \circ f \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, C)$ を対応させる集合の写像

$$\circ: \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, B) \times \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(B, C) \longrightarrow \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, C), (f, g) \longmapsto g \circ f$$

これらの構成要素は, 次の 2 条件を満たさねばならない:

- (1) (**unitality**): 任意の射 $f: A \longrightarrow B$ に対して

$$f \circ \mathrm{Id}_A = f, \quad \mathrm{Id}_B \circ f = f$$

が成り立つ.

^{*1} [?] が源流にある. [?] は創始者本人によって運営されている web サイトのようだ.

(2) (associativity) : 任意の射 $f: A \rightarrow B$, $g: B \rightarrow C$, $h: C \rightarrow D$ に対して

$$h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$$

が成り立つ.

^a $\text{Ob}(\mathcal{C})$ は, 集合論では扱えないほど大きなものになっても良い.

定義 1.2: モノ・エピ・同型射

圏 \mathcal{C} を与える.

- 射 $f: A \rightarrow B$ が**モノ射** (monomorphism) であるとは, $\forall X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して写像

$$\begin{aligned} f_*: \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, A) &\rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, B), \\ g &\mapsto f \circ g \end{aligned}$$

が集合の写像として単射であること.

- 射 $f: A \rightarrow B$ が**エピ射** (epimorphism) であるとは, $\forall X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して写像

$$\begin{aligned} f^*: \text{Hom}_{\mathcal{C}}(B, X) &\rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{C}}(A, X), \\ g &\mapsto g \circ f \end{aligned}$$

が集合の写像として単射であること.

- 射 $f: A \rightarrow B$ が**同型射** (isomorphism) であるとは, 射 $g: B \rightarrow A$ が存在して $g \circ f = \text{Id}_A$ かつ $f \circ g = \text{Id}_B$ を満たすこと. このとき f と g は互いの**逆射** (inverse) であると言い, $g = f^{-1}$, $f = g^{-1}$ と書く^a.
- $A, B \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ の間に同型射が存在するとき, 対象 A と B は**同型** (isomorphic) であると言い, $A \cong B$ と書く.

^a 逆射は存在すれば一意である.

定義 1.3: 関手

圏 \mathcal{C} , \mathcal{D} を与える. 圏 \mathcal{C} から圏 \mathcal{D} への**関手** F とは, 以下の2つの対応からなる:

- 圏 \mathcal{C} における任意の対象 $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して, 圏 \mathcal{D} における対象 $F(X) \in \text{Ob}(\mathcal{D})$ を対応づける
- 圏 \mathcal{C} における任意の射 $f: X \rightarrow Y$ に対して, 圏 \mathcal{D} における射 $F(f): F(X) \rightarrow F(Y)$ を対応づける

これらの対応は以下の条件を満たさねばならない:

(fun-1) 圏 \mathcal{C} における任意の射 $f: X \rightarrow Y$, $g: Y \rightarrow Z$ に対して,

$$F(g \circ f) \rightarrow F(g) \circ F(f)$$

(fun-2) 圏 \mathcal{C} における任意の対象 $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して,

$$F(\text{Id}_X) = \text{Id}_{F(X)}$$

文脈上明らかなきは, 圏 \mathcal{C} から圏 \mathcal{D} への関手 F のことを関手 $\mathbf{F}: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ と略記する.

定義 1.4: 忠実・充満・本質的全射

関手 $F: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ を与える.

- F が**忠実** (faithful) であるとは, $\forall X, Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して写像

$$F_{X,Y}: \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y) \rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{D}}(F(X), F(Y)), f \mapsto F(f)$$

が単射であること.

- F が**充満** (full) であるとは, $\forall X, Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して写像

$$F_{X,Y}: \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y) \rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{D}}(F(X), F(Y)), f \mapsto F(f)$$

が全射であること.

- F が**本質的全射** (essentially surjective) であるとは, $\forall Z \in \text{Ob}(\mathcal{D})$ に対して $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ が存在して $F(X)$ が Z と同型になること.

忠実充満関手のことを**埋め込み**と呼ぶ.

定義 1.5: 自然変換

2つの関手 $F, G: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ を与える. F, G の間の自然変換 (natural transformation) $\tau: F \Rightarrow G$ とは, 以下の対応からなる:

- 圏 \mathcal{C} における任意の対象 $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して, 圏 \mathcal{D} における射 $\tau_X: F(X) \rightarrow G(X)$ を対応づける

この対応は以下の条件を満たさねばならない:

(nat) 圏 \mathcal{C} における任意の射 $f: X \rightarrow Y$ に対して, 以下の図式を可換にする:

$$\begin{array}{ccc} F(X) & \xrightarrow{F(f)} & F(Y) \\ \downarrow \tau_X & & \downarrow \tau_Y \\ G(X) & \xrightarrow{G(f)} & G(Y) \end{array}$$

自然変換 $\tau: F \Rightarrow G$ であって, $\forall X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して射 $\tau_X: F(X) \rightarrow G(X)$ が同型射であるものを自然同値 (natural equivalence)^a と呼ぶ.

^a 自然同型 (natural isomorphism) ということもある.

自然変換 $\tau: F \Rightarrow G$ を



と書くことがある.

1.1.2 極限と余極限

定義 1.6: 図式

圏 \mathcal{C} と小圏 I (添字圏と呼ばれる) を与える.

\mathcal{C} における I 型の図式 (diagram of shape I) とは, 関手

$$I \rightarrow \mathcal{C}$$

のこと.

定義 1.7: 錐の圏

$D: I \rightarrow \mathcal{C}$ を図式とする.

- D 上の錐 (cone) とは,

- \mathcal{C} の対象 $C \in \text{Ob}(\mathcal{C})$
 - \mathcal{C} の射の族 $\mathbf{c}_\bullet := \{c_i \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, D(i))\}_{i \in \text{Ob}(\mathcal{I})}$
- の組 (C, \mathbf{c}_\bullet) であって, $\forall i, j \in \text{Ob}(\mathcal{I})$ および $\forall f \in \text{Hom}_{\mathcal{I}}(i, j)$ に対して

$$c_j = D(f) \circ c_i$$

を充たす, i.e. 以下の図式を可換にするもののこと.

$$\begin{array}{ccc} & C & \\ c_i \swarrow & & \searrow c_j \\ D(i) & \xrightarrow{D(f)} & D(j) \end{array}$$

- 錐の射 (morphism of cones)

$$(C, \mathbf{c}_\bullet) \xrightarrow{u} (C', \mathbf{c}'_\bullet)$$

とは, \mathcal{C} の射 $u \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, C')$ であって, $\forall i \in \text{Ob}(\mathcal{I})$ に対して

$$c_i = c'_i \circ u$$

を充たす, i.e. 以下の図式を可換にするもののこと.

$$\begin{array}{ccc} & C & \\ & \searrow u & \\ & C' & \\ c_i \swarrow & & \searrow c'_i \\ & D(i) & \end{array}$$

D 上の錐と錐の射を全て集めたものは圏 $\mathbf{Cone}(D)$ を成す.

定義 1.8: 極限

図式 $D: \mathcal{I} \longrightarrow \mathcal{C}$ の極限 (limit)^aとは, 圏 $\mathbf{Cone}(D)$ の終対象のこと. 記号として $(\lim_{\mathcal{I}} D, p_\bullet)$ と書く^b. i.e. 極限 $(\lim_{\mathcal{I}} D, p_\bullet) \in \text{Ob}(\mathbf{Cone}(D))$ は, 以下の普遍性を充たす:

(極限の普遍性)

$\forall (C, \mathbf{c}_\bullet) \in \text{Ob}(\mathbf{Cone}(D))$ に対して, 錐の射 $u \in \text{Hom}_{\mathbf{Cone}(D)}((C, \mathbf{c}_\bullet), (\lim_{\mathcal{I}} D, p_\bullet))$ が一意的に存在して, $\forall i, j \in \text{Ob}(\mathcal{I})$ および $\forall f \in \text{Hom}_{\mathcal{I}}(i, j)$ に対して図式を可換にする.



図 1.1: 極限の普遍性

^a 普遍錐 (universal cone) とも言う.

^b $\varprojlim D$ と書くこともある.

定義 1.9: 余錐の圏

$D: \mathcal{I} \longrightarrow \mathcal{C}$ を図式とする.

- D 上の余錐 (cocone) とは,
 - \mathcal{C} の対象 $C \in \text{Ob}(\mathcal{C})$
 - \mathcal{C} の射の族 $\mathbf{c}_\bullet := \{c_i \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(D(i), C)\}_{i \in \text{Ob}(\mathcal{I})}$
- の組 (C, \mathbf{c}_\bullet) であって, $\forall i, j \in \text{Ob}(\mathcal{I})$ および $\forall f \in \text{Hom}_{\mathcal{I}}(i, j)$ に対して

$$c_i = D(f) \circ c_j$$

を充たす, i.e. 以下の図式を可換にするもののこと.

$$\begin{array}{ccc} D(i) & \xrightarrow{D(f)} & D(j) \\ & \searrow c_i & \swarrow c_j \\ & C & \end{array}$$

- 余錐の射 (morphism of cocones)

$$(C, \mathbf{c}_\bullet) \xrightarrow{u} (C', \mathbf{c}'_\bullet)$$

とは, \mathcal{C} の射 $u \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, C')$ であって, $\forall i \in \text{Ob}(\mathcal{I})$ に対して

$$c'_i = u \circ c_i$$

を充たす, i.e. 以下の図式を可換にするもののこと.

$$\begin{array}{ccc} D(i) & & \\ \searrow c_i & & \searrow c'_i \\ & C & \downarrow u \\ & & C' \\ \swarrow c_j & & \swarrow c'_j \\ & C' & \end{array}$$

D 上の余錐と余錐の射を全て集めたものは圏 $\mathbf{Cone}(D)$ を成す.

定義 1.10: 余極限

図式 $D: \mathcal{I} \longrightarrow \mathcal{C}$ の余極限 (colimit)^a とは, 圏 $\mathbf{coCone}(D)$ の始対象のこと. 記号として $(\mathbf{colim}_{\mathcal{I}} D, p_{\bullet})$ と書く^b. i.e. 余極限 $(\mathbf{colim}_{\mathcal{I}} D, p_{\bullet}) \in \mathbf{Ob}(\mathbf{coCone}(D))$ は, 以下の普遍性を充たす:

(余極限の普遍性)

$\forall (\mathbf{C}, \mathbf{c}_{\bullet}) \in \mathbf{Ob}(\mathbf{coCone}(D))$ に対して, 余錐の射 $u \in \mathbf{Hom}_{\mathbf{coCone}(D)}((\mathbf{colim}_{\mathcal{I}} D, p_{\bullet}), (\mathbf{C}, \mathbf{c}_{\bullet}))$ が一意的に存在して, $\forall i, j \in \mathbf{Ob}(\mathcal{I})$ および $\forall f \in \mathbf{Hom}_{\mathcal{I}}(i, j)$ に対して図式を可換にする.



図 1.2: 余極限の普遍性

^a 普遍余錐 (universal cocone) とも言う.

^b $\varinjlim D$ と書くこともある.

【例 1.1.1】積と和

図式

$$D: \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 2 \\ \hline \bullet & \bullet \\ \hline \end{array} \longrightarrow \mathcal{C}$$

の極限を (存在すれば) 積 (product) と呼び, $D(1) \times D(2)$ と書く. 同じ図式の余極限を (存在すれば) 和^a (coproduct) と呼び, $D(1) \amalg D(2)$ と書く.

より具体的には, 圏 \mathcal{C} における 2 つの対象 $D(1), D(2) \in \mathbf{Ob}(\mathcal{C})$ の積とは,

- 圏 \mathcal{C} における 1 つの対象 $D(1) \times D(2) \in \mathbf{Ob}(\mathcal{C})$
- 圏 \mathcal{C} における 2 つの射 $p_i \in \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(D(1) \times D(2), D(i)) \quad \forall i = 1, 2$

の組であって, 任意の組 $(\mathbf{C} \in \mathbf{Ob}(\mathcal{C}), \{\mathbf{c}_i \in \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(\mathbf{C}, D(i))\}_{i \in \{1, 2\}})$ に対して以下の図式を可換にする圏 \mathcal{C} の射 $u \in \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(\mathbf{C}, D(1) \times D(2))$ が一意的に存在するようなもののこと:



具体的な圏における積は，例えば以下の通りである：

- (1) 集合と写像の圏 **Sets** における積とは，直積集合と，直積因子への射影の組のこと．
- (2) 位相空間の圏 **Top** における積とは，直積位相空間と，直積因子への連続な^b射影の組のこと．
- (3) 体 \mathbb{K} 上のベクトル空間の圏 **Sets** における積とは，直積ベクトル空間と射影^cの組のこと．これは，特に元の図式の対象が有限個である場合は直和ベクトル空間と同型である．

同様に，圏 \mathcal{C} における 2 つの対象 $D(1), D(2) \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ の和とは，

- 圏 \mathcal{C} における 1 つの対象 $D(1) \amalg D(2) \in \text{Ob}(\mathcal{C})$
- 圏 \mathcal{C} における 2 つの射 $i_j \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(D(1) \amalg D(2), D(j))$ $\text{w/ } j = 1, 2$

の組であって，任意の組 $(C \in \text{Ob}(\mathcal{C}), \{c_i \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(D(i), C)\}_{i \in \{1, 2\}})$ に対して以下の図式を可換にする圏 \mathcal{C} の射 $u \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(D(1) \amalg D(2), C)$ が一意的存在するようなものこと：



具体的な圏における和は，例えば以下の通りである：

- (1) 集合と写像の圏 **Sets** における積とは，disjoint union と，disjoint union の各成分への包含写像の組のこと．
- (2) 位相空間の圏 **Top** における積とは，disjoint union
- (3) 体 \mathbb{K} 上のベクトル空間の圏 **Sets** における積とは，直積ベクトル空間のこと．これは，特に元の図式の対象が有限個である場合は直和ベクトル空間と同型である．

^a 余積と言うこともある．

^b むしろ，直積位相とは射影という写像が連続になるような最弱の位相のことである．

^c 定義から線型写像になるため，圏 $\mathbf{Vec}_{\mathbb{K}}$ の射である．

【例 1.1.2】イコライザとコイコライザ

図式

$$D: \boxed{\begin{array}{ccc} 1 & \xrightleftharpoons[f]{g} & 2 \end{array}} \longrightarrow C$$

の極限を（存在すれば）イコライザ (equalizer) と呼び、 $\text{Eq}(D(1), D(2))$ と書く．同じ図式の余極限を（存在すれば）コイコライザ (coequalizer) と呼び、 $\text{Coeq}(D(1), D(2))$ と書く．具体的な圏における例は以下の通り：

- (1) 集合と写像の圏 **Sets** におけるイコライザとは、2つの写像 $f, g \in \text{Hom}_{\mathbf{Sets}}(X, Y)$ によって定まる X の部分集合

$$\text{Eq}(f, g) := \{x \in X \mid f(x) = g(x)\}$$

と、包含写像 $i: \text{Eq}(f, g) \longrightarrow X$ の組みである．直観的には方程式 $f(x) = g(x)$ の解空間のことである．

- (2) 集合と写像の圏 **Sets** における2つの写像 $f, g \in \text{Hom}_{\mathbf{Sets}}(X, Y)$ の間のコイコライザとは、 $f(x) \sim g(x) \forall x \in X$ を満たす Y の最小の同値関係 $\sim \subset Y \times Y$ による商集合

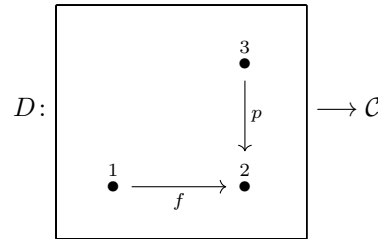
$$\text{Coeq}(f, g) := Y/\sim$$

および商写像 $q: Y \longrightarrow \text{Coeq}(f, g)$ の組みである．直観的には、 $\forall x \in X$ に対して方程式 $f(x) = g(x)$ が成立するように強引に Y に同値関係を入れて得られる商集合ということになる．

- (3) 位相空間の圏 **Top** におけるイコライザとは **Sets** におけるイコライザ $(\text{Eq}(f, g), i)$ に、 i が連続写像になるような最弱の位相を入れて得られる位相空間のこと．**Top** におけるコイコライザとは、**Sets** におけるコイコライザ $(\text{Coeq}(f, g), p)$ に、 p が連続写像になるような最強の位相を入れて得られる位相空間のこと．
- (4) 体 \mathbb{K} 上のベクトル空間の圏 $\mathbf{Vec}_{\mathbb{K}}$ における、線型写像 $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Vec}_{\mathbb{K}}}(V, W)$ と零射 $0 \in \text{Hom}_{\mathbf{Vec}_{\mathbb{K}}}(V, W)$ の間のイコライザとは、線型写像 f の核 $\text{Ker } f$ および包含準同型 $i: \text{Ker } f \hookrightarrow V$ の組みのこと． $\mathbf{Vec}_{\mathbb{K}}$ における、線型写像 $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Vec}_{\mathbb{K}}}(V, W)$ と零射 $0 \in \text{Hom}_{\mathbf{Vec}_{\mathbb{K}}}(V, W)$ の間のコイコライザとは、線型写像 f の余核 $\text{Coker } f := W/\text{Im } f$ および標準的射影 $p: W \twoheadrightarrow \text{Coker } f$ の組みのこと．

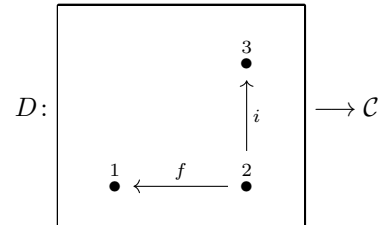
【例 1.1.3】引き戻しと押し出し

図式



の極限を（存在すれば）引き戻し^a (pullback) と呼び、 $D(1) \times_{D(3)} D(2)$ と書く。

図式



の余極限を（存在すれば）押し出しと呼び、 $D(1) \amalg_{D(3)} D(2)$ と書く。

^a ファイバー積 (fiber product) と呼ぶこともある。

定義 1.11: 完備な圏

圏 \mathcal{C} が完備 (resp. 余完備) (complete resp. cocomplete) であるとは、 \mathcal{C} における任意の図式が極限 (resp. 余極限) を持つことを言う。完備かつ余完備な圏は双完備 (bicomplete) であると言われる。

Sets は双完備である。

命題 1.1: 極限と Hom の交換

圏 \mathcal{C} の図式 $D: I \longrightarrow \mathcal{C}$ を与える。

- (1) 圏 \mathcal{C} は完備であるとする。このとき $\forall X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して、集合 $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, \lim_I D) \in \text{Ob}(\mathbf{Sets})$ は **Sets** の図式

$$I \xrightarrow{D} \mathcal{C} \xrightarrow{\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, -)} \mathbf{Sets} \quad (1.1.1)$$

の極限である。i.e. 全単射

$$\lim_{i \in I} \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(i)) \cong \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, \lim_I D)$$

が存在する。

- (2) 圏 \mathcal{C} は余完備であるとする。このとき $\forall X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して、集合 $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(\text{colim}_I D, X) \in$

$\text{Ob}(\mathbf{Sets})$ は \mathbf{Sets} の図式

$$I \xrightarrow{D} \mathcal{C} \xrightarrow{\text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X)} \mathbf{Sets}$$

の余極限である. i.e. 全単射

$$\lim_{i \in I} \text{Hom}_{\mathcal{C}}(D(i), X) \cong \text{Hom}_{\mathcal{C}}(\text{colim}_I D, X)$$

が存在する.

証明 (1) \mathcal{C} が完備なので, 図式 $D: I \longrightarrow \mathcal{C}$ の極限

$$\begin{array}{ccc} & \lim_I D & \\ p_i \swarrow & & \searrow p_j \\ D(i) & \xrightarrow{D(f)} & D(j) \end{array}$$

が存在する^{*2}. 示すべきは \mathbf{Sets} の図式

$$\begin{array}{ccc} & \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, \lim_I D) & \\ p_{i*} \swarrow & & \searrow p_{j*} \\ \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(i)) & \xrightarrow{D(f)_*} & \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(j)) \end{array}$$

が極限の普遍性を満たすことである^{*3}.

\mathbf{Sets} の図式 (1.1.1) の錐 (Y, c_{\bullet}) を任意にとる. すると錐の定義および $(-)_*$ の定義から, $\forall y \in Y$ に対して以下の図式が可換になる:

$$\begin{array}{ccc} & X & \\ c_i(y) \swarrow & & \searrow c_j(y) \\ D(i) & \xrightarrow{D(f)} & D(j) \end{array}$$

i.e. 組 $(X, c_{\bullet}(y))$ は \mathcal{C} の図式 $D: I \longrightarrow \mathcal{C}$ の錐であるから, 錐の射 $u_y: X \longrightarrow \lim_I D$ が一意に存在する. ここで写像

$$u: Y \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, \lim_I D), y \longmapsto u_y$$

を考えると, これは $\forall y \in Y$ に対して $p_{\bullet*} \circ u(y) = p_{\bullet} \circ u_y = c_{\bullet}(y)$ を満たす. i.e. \mathbf{Sets} の図式

^{*2} $i, j \in \text{Ob}(I)$ および $f_{ij} \in \text{Hom}_I(i, j)$ は任意にとる.

^{*3} $p_{i*}: \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, \lim_I D) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(i))$, $f \longmapsto p_i \circ f$ などと定義する. このように射に下付きの $*$ を書いた時は post-compose を表す. 上付きの $*$ は pre-compose である.

$$\begin{array}{ccc}
& \forall Y & \\
& \downarrow u & \\
\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, \lim_I D) & & \\
\swarrow p_{i*} \quad \searrow p_{j*} & & \\
\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(i)) & \xrightarrow{D(f)_*} & \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(j))
\end{array}$$

(Blue curved arrows are labeled c_i and c_j .)

を可換にする. u_y の定義からこのような u は一意であるから, 図式 (1.1.1) の錐 $(\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, \lim_I D), p_{\bullet*})$ が**極限の普遍性**を充たすことが分かった. 極限の一意性より

$$\lim_{i \in I} \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(i)) \cong \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, \lim_I D)$$

でなくてははいけない.

(2) \mathcal{C} が余完備なので, 図式 $D: I \rightarrow \mathcal{C}$ の余極限

$$\begin{array}{ccc}
D(i) & \xrightarrow{D(f)} & D(j) \\
& \searrow p_i \quad \swarrow p_j & \\
& \text{colim}_I D &
\end{array}$$

が存在する^{*4}. 示すべきは **Sets** の図式

$$\begin{array}{ccc}
& \text{Hom}_{\mathcal{C}}(\text{colim}_I D, X) & \\
\swarrow p_i^* \quad \searrow p_j^* & & \\
\text{Hom}_{\mathcal{C}}(D(j), X) & \xrightarrow{D(f)^*} & \text{Hom}_{\mathcal{C}}(D(i), X)
\end{array}$$

が**極限の普遍性**を充たすことだが, 以降の議論は (1) と同様である. ■

1.1.3 米田埋め込み

定義 1.12: 前層

圏 \mathcal{C} 上の圏 \mathcal{S} に値をとる**前層**とは, **関手**

$$P: \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathcal{S}$$

のこと.

前層の圏 $\text{PSh}(\mathcal{C}, \mathcal{S})$ ^{*5}とは,

- **前層** $P: \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathcal{S}$ を対象とする

^{*4} $i, j \in \text{Ob}(I)$ および $f_{ij} \in \text{Hom}_I(i, j)$ は任意にとる.

^{*5} $[\mathcal{C}^{\text{op}}, \mathcal{S}]$ や $\mathcal{S}^{\mathcal{C}^{\text{op}}}$ と書くこともある. なお, 付録 A で登場したものはこれの一例である.

- 前層 $P, Q: \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathcal{S}$ の間の自然変換 $\tau: P \Rightarrow Q$ を射とする

として構成される圏のこと^{*6}.

定義 1.13: 表現可能前層・米田埋め込み

圏 \mathcal{C} を与える. $\forall X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して, 以下で定義する前層

$$\mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X): \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}$$

のことを表現可能前層 (representable presheaf) と呼ぶ:

- $\forall Y \in \text{Ob}(\mathcal{C}^{\text{op}})$ に対して

$$\mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X)(Y) := \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, X) \in \text{Ob}(\mathbf{Sets})$$

を対応づける

- \mathcal{C}^{op} における任意の射 $g: Y \rightarrow Z^a$ に対して,

$$\begin{aligned} \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X)(g) &:= g^*: \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, X) \rightarrow \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(Z, X), \\ h &\mapsto h \circ g \end{aligned}$$

を対応付ける

^a つまり, これは \mathcal{C} における射 $g: Z \rightarrow Y$ である.

米田埋め込み (Yoneda embedding) とは, 以下で定義する関手

$$\mathbf{y}: \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})$$

のこと^a:

- $\forall X \in \text{Ob}(\mathcal{C}^{\text{op}})$ に対して表現可能前層 $\mathbf{y}(X) := \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X) \in \text{Ob}(\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets}))$ を対応付ける
- \mathcal{C} における任意の射 $f: X \rightarrow Y$ に対して, 以下で定義される自然変換 $\mathbf{y}(f): \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X) \Rightarrow \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(-, Y)$ を対応付ける:
 - $\forall Z \in \text{Ob}(\mathcal{C}^{\text{op}})$ に対して, 圏 \mathbf{Sets} における射

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(f)_Z &:= f_*: \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(Z, X) \rightarrow \mathbf{Hom}_{\mathcal{C}}(Z, Y), \\ g &\mapsto f \circ g \end{aligned}$$

を対応付ける.

^a 実際, 一部の数学者は米田埋め込みの記号に平仮名の「よ」を使っている.

^{*6} $\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathcal{S})$ の恒等射は $\forall X \in \text{Ob}(\mathcal{C}^{\text{op}})$ に対して $\text{Id}_X: X \rightarrow X$ を対応づける自然変換である.

補題 1.1: 米田の補題

前層 $F: \mathcal{C}^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ および圏 \mathcal{C} の対象 $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ を与える. このとき, 写像

$$\begin{aligned} \text{Hom}_{\text{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(\text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X), F) &\longrightarrow F(X), \\ \tau &\longmapsto \tau_X(\text{Id}_X) \end{aligned}$$

は全単射である.

米田の補題の主張は少し込み入っているが, 次のように考えれば良い:

$\tau \in \text{Hom}_{\text{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(\text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X))$ とは **自然変換**

$$\begin{array}{ccc} & \text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X) & \\ \text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X) \swarrow & \downarrow \tau & \searrow \\ \mathcal{C}^{\text{op}} & & \mathbf{Sets} \\ & \downarrow F & \\ & & \end{array}$$

のことであるから, **表現可能前層** の定義より $X \in \text{Ob}(\mathcal{C}^{\text{op}})$ に対して圏 \mathbf{Sets} における射 (i.e. 写像) $\tau_X: \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, X) \longrightarrow F(X)$ が定まる. **圏の定義** より集合 $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, X)$ には必ず恒等射という元 $\text{Id}_X \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, X)$ が含まれるので, それを写像 τ_X で送った先は $\tau_X(\text{Id}_X) \in F(X)$ として well-defined である.

証明 写像

$$\begin{aligned} \eta: F(X) &\longrightarrow \text{Hom}_{\text{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(\text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X), F), \\ s &\longmapsto \{\eta(s)_Y: \text{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, X) \longrightarrow F(Y), f \longmapsto F(f)(s)\}_{Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})} \end{aligned}$$

を考える. $\forall s \in F(X)$ を 1 つ固定する. このとき圏 \mathcal{C}^{op} における任意の射 $Y \longleftarrow Z: f$ および $\forall g \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(Z, X)$ に対して

$$\begin{aligned} \eta(s)_Y \circ \text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X)(f)(g) &= \eta(s)_Y(g \circ f) \\ &= F(g \circ f)(s) \\ &= F(f) \circ F(g)(s) \\ &= F(f) \circ \eta(s)_Z(g) \end{aligned}$$

が言える. i.e. $\eta(s)$ は自然変換であり, η は well-defined である.

ところで, $\forall \tau \in \text{Hom}_{\text{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(\text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X), F)$ に対して

$$\begin{aligned} \eta(\tau_X(\text{Id}_X)) &= \{\text{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, X) \longrightarrow F(Y), f \longmapsto F(f)(\tau_X(\text{Id}_X))\}_{Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})} \\ &= \{\text{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, X) \longrightarrow F(Y), f \longmapsto F(f) \circ \tau_X(\text{Id}_X)\}_{Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})} \\ &= \{\text{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, X) \longrightarrow F(Y), f \longmapsto \tau_Y \circ \text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X)(f)(\text{Id}_X)\}_{Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})} \\ &= \{\text{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, X) \longrightarrow F(Y), f \longmapsto \tau_Y(f \circ \text{Id}_X)\}_{Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})} \\ &= \{\text{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, X) \longrightarrow F(Y), f \longmapsto \tau_Y(f)\}_{Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})} \\ &= \tau \end{aligned}$$

が成り立ち, かつ

$$\eta(s)_X(\text{Id}_X) = F(\text{Id}_X)(s) = \text{Id}_{F(X)}(s) = s$$

が成り立つので、 η は題意の写像の逆写像である。 ■

命題 1.2: 米田埋め込みは埋め込み

米田埋め込み $\mathbf{y}: \mathcal{C} \longrightarrow \mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})$ は埋め込みである。

証明 $\forall X, Y \in \mathbf{Ob}(\mathcal{C})$ を固定する。写像

$$\begin{aligned} \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y) &\longmapsto \mathrm{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X), \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, Y)), \\ f &\longmapsto \mathbf{y}(f) \end{aligned}$$

が全単射であることを示せば良い。米田埋め込みの定義から、 $\forall f \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y)$ に対して

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(f) &= \{\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(Z, X) \longrightarrow \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(Z, Y), g \longmapsto f \circ g\}_{Z \in \mathbf{Ob}(\mathcal{C})} \\ &= \{\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(Z, X) \longrightarrow \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(Z, Y), g \longmapsto \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, Y)(g)(f)\}_{Z \in \mathbf{Ob}(\mathcal{C})} \end{aligned}$$

が成り立つが、これは米田の補題において $F = \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, Y) \in \mathbf{Ob}(\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets}))$ としたときの逆写像であり、示された。 ■

系 1.1: 同型と表現可能前層の自然同値

以下の2つは同値である：

- (1) $X, Y \in \mathbf{Ob}(\mathcal{C})$ は同型
- (2) 表現可能前層 $\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X), \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, Y) \in \mathbf{Ob}(\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets}))$ が自然同型

証明 (1) \implies (2)

$X \cong Y$ なので $f \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y), g \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, X)$ が存在して $g \circ f = \mathrm{Id}_X$ かつ $f \circ g = \mathrm{Id}_Y$ を満たす。このとき $\forall A \in \mathbf{Ob}(\mathcal{C})$ に対して

$$\tau_A: \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, X) \longrightarrow \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, Y), h \longmapsto f \circ h$$

と定義するとこれは $\eta_A: \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, Y) \longrightarrow \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, X), h \longmapsto g \circ h$ を逆射に持つので同型射であり、自然同値

$$\tau: \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X) \Longrightarrow \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, Y)$$

を定める。

(1) \longleftarrow (2)

$\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})$ における同型射とは、2つの前層の間の自然同型である。関手は同型射を保つので、命題 1.2 より示された。 ■

後の便宜のため、極限を捉え直そう。勝手な図式 $D: I^{\mathrm{op}} \longrightarrow \mathcal{C}$ を1つ固定する。また、定数関手 (constant functor)

$$\mathrm{pt}: I^{\mathrm{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

を以下のように定める：

- $\forall i \in \text{Ob}(I^{\text{op}})$ に対して, 1 点集合^{*7} $\{\text{pt}\} \in \text{Ob}(\mathbf{Sets})$ を対応付ける.
- $\forall f \in \text{Hom}_{I^{\text{op}}}(i, j)$ に対して, 恒等写像 $\text{pt} \mapsto \text{pt}$ を対応付ける.

さらに, $\forall C \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して, \mathbf{Sets} に値をとる前層

$$\text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, D(-)): I^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

を, 以下のように定義する:

- $\forall i \in \text{Ob}(I^{\text{op}})$ に対して $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(i)) \in \text{Ob}(\mathbf{Sets})$ を対応付ける.
- $\forall f \in \text{Hom}_{I^{\text{op}}}(i, j)$ に対して写像

$$\begin{aligned} D(f)_*: \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(i)) &\longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(j)), \\ g &\longmapsto F(f) \circ g \end{aligned}$$

を対応付ける.

これを用いて, \mathbf{Sets} に値をとる前層

$$\text{Hom}_{\text{PSh}(I, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, D(-))): \mathcal{C}^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

を以下のように定義する:

- $\forall C \in \text{Ob}(\mathcal{C}^{\text{op}})$ に対して, 集合

$$\text{Hom}_{\text{PSh}(I, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, D(-))) \in \text{Ob}(\mathbf{Sets})$$

を対応付ける.

- $\forall f \in \text{Hom}_{\mathcal{C}^{\text{op}}}(X, Y)$ に対して, 写像

$$\begin{aligned} \text{Hom}_{\text{PSh}(I, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(-))) &\longrightarrow \text{Hom}_{\text{PSh}(I, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, D(-))), \\ \tau &\longmapsto \tau \circ f \end{aligned}$$

を対応付ける.

命題 1.3: 極限の特徴付け

$X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ が図式 $D: I^{\text{op}} \longrightarrow \mathcal{C}$ の極限であるための必要十分条件は, \mathbf{Sets} に値をとる前層

$$\text{Hom}_{\text{PSh}(I, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, D(-))): \mathcal{C}^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

が表現可能前層

$$\text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X): \mathcal{C}^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

と自然同型になることである.

^{*7} 圏 \mathbf{Sets} における終対象である.

証明 (\Leftarrow)

自然同型

$$\theta: \text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X) \Longrightarrow \text{Hom}_{\text{PSh}(I, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, D(-)))$$

を与える. $\forall C \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ を 1 つ固定する.

まず, 集合 $\text{Hom}_{\text{PSh}(I, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, D(-)))$ が図式 D 上の C を頂点とする **錐** 全体の集合と同一視できることに注意する. 実際, $\forall \tau \in \text{Hom}_{\text{PSh}(I, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, D(-)))$ は写像の族

$$\{\tau_i: \{\text{pt}\} \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, D(i))\}_{i \in I}$$

からなるが, $\{\text{pt}\}$ は 1 点集合なので τ_i を $\tau_i(\text{pt})$ と同一視できる. i.e. $\tau_i \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, D(i))$ である. さらに, τ が **自然変換** であることから $\forall f \in \text{Hom}_{I^{\text{op}}}(i, j)$ に対して以下の図式が可換になる:

$$\begin{array}{ccc} & \{\text{pt}\} & \\ \tau_i \swarrow & & \searrow \tau_j \\ \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, D(i)) & \xrightarrow{D(f)_*} & \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, D(j)) \end{array}$$

この図式における $\text{pt} \in \{\text{pt}\}$ の行き先を追跡することで

$$D(f) \circ \tau_i = \tau_j$$

が分かるが, これはまさに **錐の定義** である.

以上の考察から, 自然同型 θ は, 図式 D の勝手な錐 $(C, \tau) \in \text{Ob}(\mathbf{Cone}(D))$ が与えられると, 対応する $\theta_X^{-1}(\tau) \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(C, X)$ を一意的に定めるが, これは **極限の普遍性** に他ならない. 特に, **米田の補題** から自然同型 θ は $\theta_X(\text{Id}_X) \in \text{Hom}_{\text{PSh}(I, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, D(-)))$ と対応付き, $(X, \theta_X(\text{Id}_X)) \in \text{Ob}(\mathbf{Cone}(D))$ が図式 D の極限である.

(\Rightarrow)

上述の議論から明らか.

■

1.1.4 重み付き極限・エンド・コエンド

重み付き極限 とは, 命題 1.3 の一般化である.

定義 1.14: 重み付き極限

図式 $D: I^{\text{op}} \rightarrow \mathcal{C}$ および **Sets** に値をとる任意の前層 $W: I^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}$ を与える.

図式 D の **W -重み付き極限** (W -weighted limit) とは, (存在すれば) 圏 \mathcal{C} の対象 $\lim^W D \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ であって, **Sets** に値をとる前層

$$\text{Hom}_{\mathbf{PSH}(I, \mathbf{Sets})} \left(W, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, D(-)) \right): \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}$$

と **表現可能前層**

$$\text{Hom}_{\mathcal{C}}(-, \lim^W D): \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}$$

が **自然同型** となるもののこと.

Hom 関手

$$\text{Hom}_{\mathcal{C}}: \mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Sets}$$

を以下で定義する:

- $\forall (X, Y) \in \text{Ob}(\mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{C})$ に対して $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y) \in \text{Ob}(\mathbf{Sets})$ を対応付ける.
- $\forall (f, g) \in \text{Hom}_{\mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{C}}((X, Y), (X', Y'))$ に対して, 写像

$$\begin{aligned} \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y) &\longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X', Y'), \\ h &\longmapsto g \circ h \circ f \end{aligned}$$

を対応付ける.

定義 1.15: エンド

関手 $F: \mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ の **エンド** (end) とは, (存在すれば) **$\text{Hom}_{\mathcal{C}}$ -重み付き極限**

$$\int_{C \in \text{Ob}(\mathcal{C})} F(C, C) := \lim^{\text{Hom}_{\mathcal{C}}} F \in \text{Ob}(\mathcal{D})$$

のこと.

1.1.5 随伴

定義 1.16: 随伴

関手 $F: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$, $G: \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{C}$ を与える. F が G の左随伴 (left adjoint) であり, かつ G が F の右随伴 (right adjoint) であるとは, 2つの関手

$$\begin{aligned}\mathrm{Hom}_{\mathcal{D}}(F(-), -) &: \mathcal{C}^{\mathrm{op}} \times \mathcal{D} \rightarrow \mathbf{Sets}, \\ \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, G(-)) &: \mathcal{C}^{\mathrm{op}} \times \mathcal{D} \rightarrow \mathbf{Sets}\end{aligned}$$

の間に自然同型

$$\begin{array}{ccc} & \mathrm{Hom}_{\mathcal{D}}(F(-), -) & \\ \mathrm{Hom}_{\mathcal{D}}(F(-), -) \swarrow & \Downarrow & \searrow \mathrm{Hom}_{\mathcal{D}}(F(-), -) \\ \mathcal{C}^{\mathrm{op}} \times \mathcal{D} & & \mathbf{Sets} \\ \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, G(-)) \swarrow & \Downarrow & \searrow \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, G(-)) \\ & \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, G(-)) & \end{array}$$

が存在することを言う.

F が G の左随伴である (全く同じことだが, G が F の右随伴である) ことを $F \dashv G$ と書く. 図式中では

$$\begin{array}{ccc} & F & \\ \mathcal{C} & \xrightarrow{\quad} & \mathcal{D} \\ & \perp & \\ & G & \end{array}$$

のように書く.

さて, 圏 \mathcal{C} 上の図式 $D: I \rightarrow \mathcal{C}$ が余極限を持つとする:

$$\begin{array}{ccc} & D(\forall i) & \\ & \searrow & \swarrow \\ \mathrm{colim}_I D & \xrightarrow{\exists!} & \forall X \end{array}$$

このとき, \mathcal{D} 上の図式として

$$\begin{array}{ccc} & F(D(\forall i)) & \\ & \searrow & \swarrow \\ \mathrm{colim}_I F(D) & \xrightarrow{\exists! u} & F(\mathrm{colim}_I D) \end{array}$$

を考えることができる. 特に, 一意に定まる射 $u: \mathrm{colim}_I F(D) \rightarrow F(\mathrm{colim}_I D)$ が同型するとき, 関手 F は余極限を保つという.

同様に, 圏 \mathcal{D} 上の図式 $D: I \rightarrow \mathcal{C}$ が極限を持つとする:

$$\begin{array}{ccc} \lim_I D & \xleftarrow{\exists!} & \forall X \\ & \searrow & \swarrow \\ & D(\forall i) & \end{array}$$

このとき、 \mathcal{D} 上の図式として

$$\begin{array}{ccc} \lim_I F(D) & \xleftarrow{\exists! u} & F(\lim_I D) \\ & \searrow & \swarrow \\ & F(D(\forall i)) & \end{array}$$

を考えることができる。特に、一意に定まる射 $u: F(\lim_I D) \rightarrow \lim_I F(D)$ が同型するとき、関手 F は極限を保つという。

命題 1.4: 随伴と極限・余極限

関手 $F: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$, $G: \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{C}$ が $F \dashv G$ であるとする。このとき、 F は余極限を保ち、 G は極限を保つ。

証明 余極限を持つ任意の \mathcal{C} の図式 $D: I \rightarrow \mathcal{C}$ を 1 つ固定する。随伴の定義および命題 1.1 より、 $\forall Y \in \text{Ob}(\mathcal{D})$ に対して

$$\begin{aligned} \text{Hom}_{\mathcal{D}}(F(\text{colim}_I D), Y) &\cong \text{Hom}_{\mathcal{C}}(\text{colim}_I D, G(Y)) \\ &\cong \lim_I \text{Hom}_{\mathcal{C}}(D(i), G(Y)) \\ &\cong \lim_I \text{Hom}_{\mathcal{D}}(F(D(i)), Y) \\ &\cong \text{Hom}_{\mathcal{D}}(\text{colim}_I F(D), Y) \end{aligned}$$

が言える。i.e. 自然同型

$$\begin{array}{ccc} \text{Hom}_{\mathcal{D}}(F(\text{colim}_I D), -) & & \\ \curvearrowright & \Downarrow & \curvearrowleft \\ \mathcal{D} & & \mathbf{Sets} \\ \curvearrowleft & \Downarrow & \curvearrowright \\ \text{Hom}_{\mathcal{D}}(\text{colim}_I F(D), -) & & \end{array}$$

があるので、米田の補題の系より

$$F(\text{colim}_I D) \cong \text{colim}_I F(D)$$

が示された。 ■

1.1.6 Kan 拡張

定義 1.17: スライス圏

圏 \mathcal{D} およびその対象 $X \in \text{Ob}(\mathcal{D})$ を与える. スライス圏 (slice category) $\mathcal{D}_{/X}$ とは, 以下のデータからなる圏のこと:

- \mathcal{D} の対象と射の組 $(D \in \text{Ob}(\mathcal{D}), \alpha: D \rightarrow X)$ を対象に持つ
- $(D, \alpha), (D', \alpha')$ の間の射は, \mathcal{D} における射 $\beta: D \rightarrow D'$ であって \mathcal{D} における図式

$$\begin{array}{ccc} D & \xrightarrow{\beta} & D' \\ & \searrow \alpha & \swarrow \alpha' \\ & X & \end{array}$$

を可換にするものとする

双対スライス圏 (dual slice category) $\mathcal{D}_{X/}$ とは, 以下のデータからなる圏のこと:

- \mathcal{D} の対象と射の組 $(D \in \text{Ob}(\mathcal{D}), \alpha: X \rightarrow D)$ を対象に持つ
- $(D, \alpha), (D', \alpha')$ の間の射は, \mathcal{D} における射 $\beta: D \rightarrow D'$ であって \mathcal{D} における図式

$$\begin{array}{ccc} D & \xrightarrow{\beta} & D' \\ & \swarrow \alpha & \searrow \alpha' \\ & X & \end{array}$$

を可換にするものとする

関手^{*8} $\mathcal{D}_{/X} \rightarrow \mathcal{D}, (D, \alpha) \mapsto D$ のことを標準的忘却関手 (canonical forgetful functor) と呼ぶ. 標準的関手は図式中でも記号で明記しないことが多い.

関手 $F: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ および圏 \mathcal{D} における対象 $X \in \mathcal{D}$ を与える. このとき関手 F に関するスライス圏を, 圏全体がなす圏 \mathbf{Cat} における引き戻し

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{F}_{/X} & \longrightarrow & \mathcal{D}_{/X} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \mathcal{C} & \xrightarrow{F} & \mathcal{D} \end{array}$$

として定義する. i.e. $\mathcal{F}_{/X}$ の対象は $(C \in \mathcal{C}, \alpha: F(C) \rightarrow X)$ であり, $(C, \alpha), (C', \alpha')$ の間の射とは, \mathcal{C} における射 $\beta: C \rightarrow C'$ であって \mathcal{D} における図式

$$\begin{array}{ccc} F(C) & \xrightarrow{F(\beta)} & F(C') \\ & \searrow \alpha & \swarrow \alpha' \\ & X & \end{array}$$

を可換にするものである.

^{*8} 対象の対応のみ明示した.

定理 1.2: density theorem

前層 $F: \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}$ を与える. 関手 $\mathfrak{y}: \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})$ を **米田埋め込み** とする.

このとき, 前層の圏 $\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})$ における **同型**

$$F \cong \operatorname{colim}_{X \in \mathfrak{y}/F} \operatorname{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X)$$

が成り立つ.

証明 **米田の補題**の系により, 示すべきは **自然同型**

$$\operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(\operatorname{colim}_{X \in \mathfrak{y}/F} \operatorname{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X), -) \Longrightarrow \operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(F, -)$$

である. このとき, $\forall G \in \operatorname{Ob}(\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets}))$ に対して

$$\begin{aligned} \operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(\operatorname{colim}_{X \in \mathfrak{y}/F} \operatorname{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X), G) &\cong \lim_{X \in \mathfrak{y}/F} \operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(\operatorname{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X), G) && \because \text{命題 1.1} \\ &\cong \lim_{X \in \mathfrak{y}/F} G(X) && \because \text{米田の補題} \end{aligned}$$

なる自然同型がある. さらに, 命題 1.3 と同様の議論により **定数関手** $\text{pt} \in \operatorname{Ob}(\mathbf{PSh}(\mathfrak{y}/F, \mathbf{Sets}))$ による自然な同型

$$\lim_{X \in \mathfrak{y}/F} G(X) \cong \operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathfrak{y}/F, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, G)$$

があることが分かる. よって自然な同型

$$\operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathfrak{y}/F, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, G) \cong \operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(F, G)$$

を示せば十分である.

ところで, **自然変換** $\tau \in \operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathfrak{y}/F, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, G)$ は, 写像の族

$$\{\tau_{(X, \alpha)}: \{\text{pt}\} \rightarrow G(X)\}_{(X, \alpha) \in \operatorname{Ob}(\mathfrak{y}/F)}$$

からなるが, $\{\text{pt}\}$ は一点集合なので $\tau_{(X, \alpha)}$ と $\tau_{(X, \alpha)}(\text{pt})$ を同一視して良い. 一方で $\forall (X, \alpha) \in \operatorname{Ob}(\mathfrak{y}/F)$ について $\alpha \in \operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(\mathfrak{y}(X), F) = \operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(\operatorname{Hom}_{\mathcal{C}}(-, X), F)$ であるから, **米田の補題**からこれは $\alpha_X(\operatorname{Id}_X) \in F(X)$ と一対一対応する. この対応により $\forall X \in \mathcal{C}^{\text{op}}$ について写像

$$\eta(\tau)_X: F(X) \rightarrow G(X), \alpha_X(\operatorname{Id}_X) \mapsto \tau_{(X, \alpha)}$$

が得られる. α は自然変換なので $\eta(\tau)_X$ を全て集めたものは自然変換 $\eta(\tau): F \Rightarrow G$ になる. よって写像

$$\operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathfrak{y}/F, \mathbf{Sets})}(\text{pt}, G) \rightarrow \operatorname{Hom}_{\mathbf{PSh}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})}(F, G), \tau \mapsto \eta(\tau)$$

は自然な同型であり, 証明が完了した. ■

定義 1.18: Kan 拡張

$i: \mathcal{C}_0 \hookrightarrow \mathcal{C}$ を \mathcal{C} の小部分圏, \mathcal{D} を双完備な圏とする.

- 関手 $F: \mathcal{C}_0 \rightarrow \mathcal{D}$ の, 関手 i に沿った左 Kan 拡張 (left Kan extension) とは,

$$i_!(F)(x) := \operatorname{colim}_{c \in (\mathcal{C}_0)_{/x}} F(c)$$

によって定義される関手

$$i_!: \operatorname{Fun}(\mathcal{C}_0, \mathcal{D}) \rightarrow \operatorname{Fun}(\mathcal{C}, \mathcal{D})$$

によって定まる関手 $i_!(F): \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ のこと.

- 関手 $F: \mathcal{C}_0 \rightarrow \mathcal{D}$ の, 関手 i に沿った右 Kan 拡張 (right Kan extension) とは,

$$i_*(F)(x) := \lim_{c \in (\mathcal{C}_0)_{x/}} F(c)$$

によって定義される関手

$$i_*: \operatorname{Fun}(\mathcal{C}_0, \mathcal{D}) \rightarrow \operatorname{Fun}(\mathcal{C}, \mathcal{D})$$

によって定まる関手 $i_*(F): \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ のこと.

制限関手

$$i^*: \operatorname{Fun}(\mathcal{C}, \mathcal{D}) \rightarrow \operatorname{Fun}(\mathcal{C}_0, \mathcal{D})$$

について $i_! \dashv i^*$ かつ $i_* \vdash i^*$ である.

1.2 単体的集合

higher geometry において重要な役割を果たす単体的集合の圏を定義する.

定義 1.19: 単体圏

- $\forall n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ に対して, 全順序付集合 $[n] := \{0, 1, \dots, n\}$ のことを n -単体 (n -simplex) と呼ぶ.
- 単体圏 (simplex category) Δ とは,
 - $\forall n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ に対して, n -単体 $[n]$ を対象とする.
 - 順序を保つ写像を射とする
 圏のこと.

特に $\operatorname{Hom}_{\Delta}([n-1], [n])$ の元のうち

$$d_i^n: [n-1] \hookrightarrow [n], x \mapsto \begin{cases} x, & x < i \\ x+1 & x \geq i \end{cases} \quad \text{w/ } i = 0, \dots, n$$

のことを面写像 (face map) と呼び, $\text{Hom}_\Delta([n+1], [n])$ の元のうち

$$s_i^n: [n+1] \rightarrow [n], x \mapsto \begin{cases} x, & x \leq i \\ x-1 & x > i \end{cases} \quad \text{w/ } i = 0, \dots, n$$

のことを縮退写像 (degeneracy map) と呼ぶ.

定義 1.20: 単体的集合

- 単体的集合 (simplicial set) とは, 前層

$$K: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

のこと. 特に n -単体 $[n] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}})$ の表現可能前層を $\Delta^n := \text{Hom}_\Delta(-, [n]) \in \text{Ob}(\mathbf{SimpSet})$ と書く.

- 余単体的集合 (cosimplicial set) とは, 関手

$$K: \Delta \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

のこと.

- 単体的集合 $S: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ が単体的集合 $K: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ の単体的部分集合 (simplicial subset) であるとは, 以下の 2 条件を満たすことを言う:

(sub-1) $\forall n \geq 0$ に対して $S([n]) \subset K([n])$

(sub-2) 圏 Δ における任意の射 $\alpha: [n] \longrightarrow [m]$ に対して $K(\alpha)(S([m])) \subset S([n])$

誤解の恐れがないときは, 単体的部分集合を $S \subset K$ と書く.

- 単体的集合の圏 $\mathbf{SimpSet}$ とは, 前層の圏

$$\mathbf{SimpSet} := \mathbf{PSh}(\Delta, \mathbf{Sets})$$

のこと.

$K_n := K([n])$ とおく.

- K_n の元のことを n -単体 (n -simplex)
- $\partial_i := K(d_i): K_n \rightarrow K_{n-1}$ のことを面写像 (face map)
- $\sigma_i := K(s_i): K_n \hookrightarrow K_{n+1}$ のことを縮退写像 (degeneracy map) と呼ぶ.

と呼ぶ. これらは以下の単体的恒等式 (simplicial identities) を満たす:

$$\begin{aligned} \partial_i^{n-1} \circ \partial_j^n &= \partial_{j-1}^{n-1} \circ \partial_i^n & (i < j), \\ \partial_i^{n+1} \circ \sigma_j^n &= \sigma_{j-1}^{n-1} \circ \partial_i^n & (i < j), \\ \partial_i^{n+1} \circ \sigma_j^n &= \sigma_j^{n-1} \circ \partial_{i-1}^n & (i > j+1), \\ \partial_i^{n+1} \circ \sigma_j^n &= \text{id} & (i = j, j+1), \\ \sigma_i^{n+1} \circ \sigma_j^n &= \sigma_{j+1}^{n+1} \circ \sigma_i^n & (i \leq j) \end{aligned} \tag{1.2.1}$$

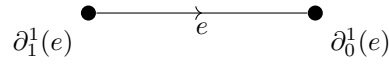
逆に,

- 対象の族 $\{K_n\}_{n \geq 0}$
- 射の族 $\{\partial_i^n: K_n \longrightarrow K_{n-1}\}_{0 \leq i \leq n, n \geq 0}$
- 射の族 $\{\sigma_i^n: K_n \longrightarrow K_{n+1}\}_{0 \leq i \leq n, n \geq 0}$

の組であって単体的恒等式を充たすものは単体的集合を一意に定める [?, Proposition 1.1.2.14].

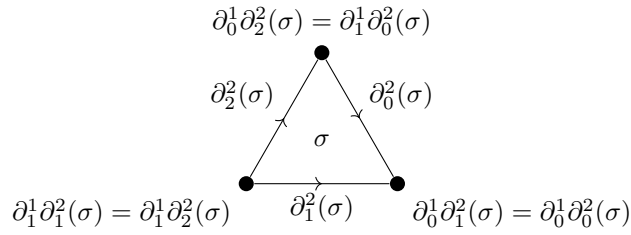
単体的集合 $K: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ を図示する方法がある.

- (1) K_0 の元 (i.e. 0-単体) を点と見做し, $K_0 = \{\bullet, \dots, \bullet\}$ のように書く.
- (2) K_1 の元 (i.e. 1-単体) $e \in K_1$ を



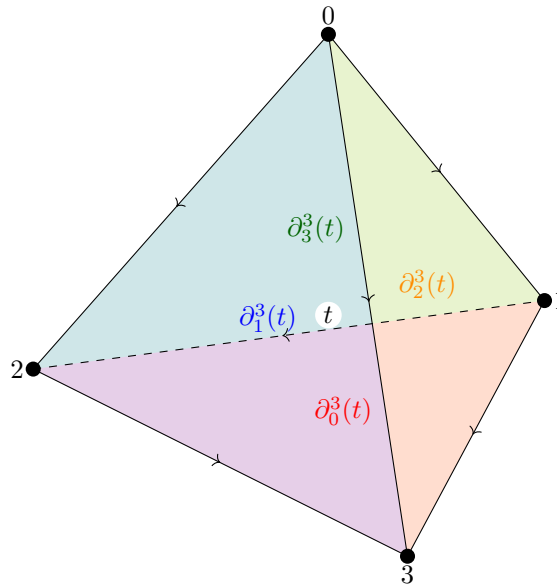
のように有向辺として図示する.

- (3) K_2 の元 (i.e. 2-単体) $\sigma \in K_2$ を



のように向きづけられた三角形として図示する. この図は単体的恒等式 (1.2.1) を表している.

- (4) K_3 の元 (i.e. 3-単体) $t \in K_3$ を,



のように向き付けられた四面体として図示する. 四面体の面の繋がり方が単体的恒等式 (1.2.1) を表し

ている.

(5) K_n の元 (i.e. n -単体) は, 単体的恒等式 (1.2.1) によって帰納的に図示する.

命題 1.5: 単体的集合の圏の基本性質

よ: $\Delta \rightarrow \mathbf{SimpSet}$ を **米田埋め込み** とする.

(1) 任意の **単体的集合** $K: \Delta^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}$ に対して, **自然な同型**

$$\text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(\Delta^n, K) \cong K_n$$

が成り立つ.

(2) 圏 **SimpSet** は **双完備** である.

(3) 任意の **単体的集合** $K: \Delta^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}$ に対して,

$$K \cong \text{colim}_{[n] \in \mathbb{J}/K} \Delta^n$$

が成り立つ.



命題 1.5-(1) によって, **n -単体** $\sigma \in K_n$

証明 (1) **米田の補題** より

$$\text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(\Delta^n, K) = \text{Hom}_{\mathbf{PSh}(\Delta, \mathbf{Sets})}(\text{Hom}_{\Delta}(-, [n]), K) \cong K([n]) = K_n$$

(2)

(3) 定理 1.2 より

$$K \cong \text{colim}_{[n] \in \mathbb{J}/K} \text{Hom}_{\Delta}(-, [n]) = \text{colim}_{[n] \in \mathbb{J}/K} \Delta^n$$

■

1.2.1 幾何学的実現

定義 1.20 を再現する具体的な構成をする.

定義 1.21: 幾何学的 n -単体

- 幾何学的 n -単体 Δ_{top}^n とは, 位相空間

$$\Delta_{\text{top}}^n := \left\{ (x^0, \dots, x^n) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid x_i \geq 0, \sum_{i=0}^n x_i = 1 \right\}$$

のこと.

- 余単体的集合**

$$\Delta_{\text{top}}: \Delta \rightarrow \mathbf{Top}$$

とは,

- n -単体 $[n] \in \text{Ob}(\Delta)$ に対して幾何学的 n -単体 Δ_{top}^n を対応づける
- 圏 Δ における任意の射 $\alpha: [n] \rightarrow [m]$ に対して, 連続写像

$$\Delta_{\text{top}}(\alpha): \Delta_{\text{top}}^n \rightarrow \Delta_{\text{top}}^m, (x_0, \dots, x_n) \mapsto \left(\sum_{j, \alpha(j)=0} x_j, \dots, \sum_{j, \alpha(j)=m} x_j \right)$$

を対応付ける

関手のこと.

- 位相空間 $X \in \text{Ob}(\mathbf{Top})$ の特異単体 (singular simplicial set) とは, 単体的集合

$$S(X): \Delta^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}, [n] \mapsto \text{Hom}_{\mathbf{Top}}(\Delta_{\text{top}}^n, X)$$

のこと.

- 特異複体とは, 関手 $S: \mathbf{Top} \rightarrow \mathbf{SimpSet}, X \mapsto S(X)$ のこと.

定義 1.22: 幾何学的実現

よ: $\Delta \rightarrow \mathbf{SimpSet}$ を米田埋め込みとする. 幾何学的実現 (geometric realization) とは, 余極限を保つ関手

$$|-|: \mathbf{SimpSet} \rightarrow \mathbf{Top}, K \mapsto \text{colim}_{[n] \in \mathcal{J}_K} \Delta_{\text{top}}([n])$$

のこと.

\mathbf{Top} における colim の公式を使うと

$$|K| = \left(\coprod_{[n] \in \text{Ob}(\Delta)} (K_n \times \Delta_{\text{top}}^n) \right) / \left\{ (\alpha^*(x), t) \sim (x, \Delta_{\text{top}}(\alpha)(t)) \mid \begin{array}{l} x \in K_n, t \in \Delta_{\text{top}}^m, \\ \alpha \in \text{Hom}_{\Delta}([m], [n]) \end{array} \right\}$$

となる.

命題 1.6:

特異複体 $S: \mathbf{Top} \rightarrow \mathbf{SimpSet}, X \mapsto S(X)$ は幾何学的実現 $|-|: \mathbf{SimpSet} \rightarrow \mathbf{Top}$ の右随伴である.

証明 右随伴の定義を思い出すと, $\forall (K, X) \in \text{Ob}(\mathbf{SimpSet}^{\text{op}} \times \mathbf{Top})$ に対して自然同型

$$\text{Hom}_{\mathbf{Top}}(|K|, X) \cong \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}^{\text{op}}}(K, S(X))$$

が成り立つことを示せば良い. 実際, 命題 1.1 より

$$\text{Hom}_{\mathbf{Top}}(|K|, X) = \text{Hom}_{\mathbf{Top}}\left(\text{colim}_{[n] \in \mathcal{J}_K} \Delta_{\text{top}}^n, X\right) \cong \lim_{[n] \in \mathcal{J}_K} \text{Hom}_{\mathbf{Top}}(\Delta_{\text{top}}^n, X)$$

が, 命題 1.5-(3) より

$$\text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}^{\text{op}}}(K, S(X)) \cong \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}^{\text{op}}}\left(\text{colim}_{[n] \in \mathcal{J}_K} \Delta^n, S(X)\right) \cong \lim_{[n] \in \mathcal{J}_K} \text{Hom}_{\mathbf{Top}}(\Delta^n, X)$$

が言える. ■

1.2.2 境界・角・背骨

定義 1.23: 境界・角・背骨・骨格

- $\Delta^n \in \text{Ob}(\mathbf{SimpSet})$ の単体的境界 (simplicial boundary) $\partial\Delta^n$ とは, Δ^n の単体的部分集合

$$\partial\Delta^n: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

であって

$$\partial\Delta^n([k]) := \begin{cases} \Delta^n([k]), & k \neq n \\ \Delta^n([k]) \setminus \{\text{Id}_{[n]}\}, & k = n \end{cases}$$

を充たすもののこと.

- 任意の部分集合 $S \subset [n]$ を与える. S -角 (S -horn) とは, Δ^n の単体的部分集合

$$\Lambda_S^n: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

であって,

$$\Lambda_S^n([k]) := \{ f \in \Delta^n([k]) \mid [n] \setminus (f([k]) \cup S) \neq \emptyset \}$$

を充たすもののこと. 特に $\Lambda_j^n := \Lambda_{\{j\}}^n$ は $0 < j < n$ のとき内部角 (inner horn), $j = 0, n$ のとき外部角 (outer horn) と呼ばれる.

- 背骨 (spine) とは, Δ^n の単体的部分集合

$$I^n: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

であって,

$$I^n([k]) := \{ f \in \Delta^n([k]) \mid f([k]) = \{j\} \text{ or } f([k]) = \{j, j+1\} \} \subset \Delta^n([k])$$

を充たすもののこと.

- 単体的集合 $K: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ の n -骨格 (n -skelton) とは, 濃度 $n+1$ 以下の対象からなる Δ の充満部分圏 $i: \Delta_{\leq n} \hookrightarrow \Delta$ に沿った, 関手 $i^*(K): (\Delta_{\leq n})^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ の左 Kan 拡張 $i_!(i^*(K)): \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ のこと.
- 単体的集合 $K: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ の n -余骨格 (n -coskelton) とは, 濃度 $n+1$ 以下の対象からなる Δ の充満部分圏 $i: \Delta_{\leq n} \hookrightarrow \Delta$ に沿った, 関手 $i^*(K): (\Delta_{\leq n})^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ の右 Kan 拡張 $i_*(i^*(K)): \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ のこと.

命題 1.7: コイコライザとしての境界

境界 $\partial\Delta^n$ は圏 **SimpSet** におけるコイコライザである:

$$\coprod_{0 \leq i < j \leq n} \Delta^{n-2} \xrightarrow[v]{u} \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1} \xrightarrow{w} \partial\Delta^n$$

証明 $0 \leq \forall k \leq n$ に対して, 圏 **SimpSet** における射 (i.e. 自然変換)

$$u_k: \coprod_{0 \leq i < k} \Delta^{n-2} \longrightarrow \Delta^{n-1}$$

$$v_k: \coprod_{k < j \leq n} \Delta^{n-2} \longrightarrow \Delta^{n-1}$$

を

$$u_k := \left\{ u_{k[m]}: \coprod_{0 \leq i < k} \Delta^{n-2}([m]) \longrightarrow \Delta^{n-2}([m]), (i, \alpha) \mapsto d_i^{n-1} \circ \alpha \right\}_{[m] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}})}$$

$$v_k := \left\{ u_{k[m]}: \coprod_{k < j \leq n} \Delta^{n-2}([m]) \longrightarrow \Delta^{n-2}([m]), (j, \alpha) \mapsto d_{j-1}^{n-1} \circ \alpha \right\}_{[m] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}})}$$

により定義する^{*9}. そして圏 **SimpSet** における2つの余積を

$$\begin{array}{ccccc} \coprod_{0 \leq i < j \leq n} \Delta^{n-2} & = & \coprod_{0 \leq k \leq n} \coprod_{0 \leq i < k} \Delta^{n-2} & \xrightarrow{\exists! u} & \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1} \\ \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ \coprod_{0 \leq i < k} \Delta^{n-2} & \xrightarrow{u_k} & \Delta^{n-1} & & \Delta^{n-1} \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \coprod_{0 \leq i < j \leq n} \Delta^{n-2} & = & \coprod_{0 \leq k \leq n} \coprod_{k < j \leq n} \Delta^{n-2} & \xrightarrow{\exists! v} & \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1} \\ \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ \coprod_{k < j \leq n} \Delta^{n-2} & \xrightarrow{v_k} & \Delta^{n-1} & & \Delta^{n-1} \end{array}$$

のようにとる. さらに射

$$w: \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1} \longrightarrow \partial\Delta^n$$

を

$$w := \left\{ w_{[m]}: \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1}([m]) \longrightarrow \partial\Delta^n([m]), (k, \beta) \mapsto d_k^n \circ \beta \right\}_{[m] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}})}$$

で定義する^{*10}. すると $\forall [m] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}}), \forall ((i < j), \alpha) \in \coprod_{0 \leq i < j \leq n} \Delta^{n-2}([m])$ に対して

$$(w \circ u)_{[m]}((i < j), \alpha) = w_{[m]}(j, u_{j[m]}(i, \alpha))$$

^{*9} $\coprod_i \Delta^{n-2}([m]) = \coprod_i \text{Hom}_\Delta([m], [n-2])$ は集合と写像の圏 **Sets** における余積なので, 集合としては $\bigcup_i \{(i, \alpha) \mid \alpha \in \text{Hom}_\Delta([m], [n-2])\}$ と 1 対 1 対応する.

^{*10} $\forall (k, \beta) \in \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1}([m]) = \coprod_{0 \leq k \leq n} \text{Hom}_\Delta([m], [n-1])$ に対して $w_{[m]}(k, \beta) = d_k^n \circ \beta \in \text{Hom}_\Delta([m], [n]) = \Delta^n([m])$ であり, $d_k^n \in \text{Hom}_\Delta([n-1], [n])$ は全射でないため $m = n$ のときも $w_{[m]}(k, \beta) \in \Delta^n([m]) \setminus \{\text{Id}_{[n]}\}$ が言える. よって w の像は $\partial\Delta^n$ の単体的部分集合である.

$$\begin{aligned}
&= d_j^n \circ d_i^{n-1} \circ \alpha, \\
(w \circ v)_{[m]}((i < j), \alpha) &= w_{[m]}(i, v_{[m]}(j, \alpha)) \\
&= d_i^n \circ d_{j-1}^{n-1} \circ \alpha
\end{aligned}$$

が成り立ち、単体的恒等式 (1.2.1) より $w \circ u = w \circ v$ が分かる. よってコイコライザの普遍性から圏 **SimpSet** の可換図式

$$\begin{array}{ccc}
\coprod_{0 \leq i < j \leq n} \Delta^{n-2} & \xrightleftharpoons[u]{u} & \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1} \xrightarrow{q} \text{Coeq}(u, v) \\
& & \searrow w \quad \downarrow \exists! \bar{w} \\
& & \partial \Delta^n
\end{array}$$

が成り立つ. 後は $\bar{w}: \text{Coeq}(u, v) \rightarrow \partial \Delta^n$ が自然同値であることを示せば良い.

(\bar{w} はエピ射)

w がエピ射であることを示す. そのためには $\forall [m] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}})$ を 1 つ固定し, 写像 $w_{[m]}: \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1}([m]) \rightarrow \partial \Delta^n([m])$ が全射であることを示せば良い.

$\forall \gamma \in \partial \Delta^n([m])$ を 1 つ固定する. このとき $\gamma \in \text{Hom}_\Delta([m], [n])$ は全射でない. i.e. ある $0 \leq i \leq n$ が存在して, 圏 Δ において γ は

$$\begin{array}{ccc}
[m] & \xrightarrow{\gamma} & [n] \\
& \searrow \exists! \bar{\gamma} & \uparrow \\
& & [n] \setminus \{i\}
\end{array}$$

と一意的に分解する. $d_i^n([n-1]) = [n] \setminus \{i\}$ かつ d_i^n は単射なので, ある $(i, \beta_i) \in \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1}([m])$ が一意的に存在して $\bar{\gamma} = d_i^n \circ \beta_i = w_{[m]}(i, \beta_i)$ が成り立つ.

(\bar{w} はモノ射)

$\forall [m] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}})$ を 1 つ固定し, 写像 $\bar{w}_{[m]}: \text{Coeq}(u, v)([m]) \rightarrow \partial \Delta^n([m])$ が全射であることを示す.

$\bar{w}_{[m]}(x) = \bar{w}_{[m]}(y)$ を仮定する. $q: \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1} \rightarrow \text{Coeq}(u, v)$ はエピなので, $x = q_{[m]}(i, \beta_i)$, $y = q_{[m]}(j, \beta_j)$ を充たす $(i, \beta_i), (j, \beta_j) \in \coprod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1}([m])$ が存在する. コイコライザの普遍性の図式の可換性から $w_{[m]}(i, \beta_i) = \bar{w}_{[m]}(x) = \bar{w}_{[m]}(y) = w_{[m]}(j, \beta_j)$ が分かる.

$i = j$ ならば $x = y$ は自明なので, $i < j$ とする. このとき, エピ射であることの証明から $\gamma := w_{[m]}(i, \beta_i) = w_{[m]}(j, \beta_j) \in \partial \Delta^n([m])$ の像は $[n] \setminus \{i < j\}$ に収まっている. i.e. γ は

$$\begin{array}{ccc}
[m] & \xrightarrow{\gamma} & [n] \\
& \searrow \bar{\gamma} & \uparrow \\
& & [n] \setminus \{i < j\}
\end{array}$$

と分解する. $d_j^n d_i^{n-1}([n-2]) = d_i^n d_{j-1}^{n-1}([n-2]) = [n] \setminus \{i < j\}$ なので, ある $((i < j), \alpha) \in \coprod_{0 \leq k < l \leq n} \Delta^{n-2}([m])$ が存在して $(i, \beta_i) = u_{[m]}((i < j), \alpha)$, $(j, \beta_j) = v_{[m]}((i < j), \alpha)$ と書ける.

よって

$$x = q_{[m]}(i, \beta_i) = (q \circ u)_{[m]}((i < j), \gamma) = (q \circ v)_{[m]}((i < j), \gamma) = q_{[m]}(j, \beta_j) = y$$

が言えた.

■

系 1.3: 境界の公式

$\forall K \in \text{Ob}(\mathbf{SimpSet})$ に対して, 写像

$$\begin{aligned} \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(\partial\Delta^n, K) &\longrightarrow \left\{ (\sigma_0, \dots, \sigma_n) \in \prod_{0 \leq k \leq n} K_{n-1} \mid 0 \leq \forall i < j \leq n, \partial_i^{n-1}(\sigma_j) = \partial_{j-1}^{n-1}(\sigma_i) \right\}, \\ f &\longmapsto (f \circ d_0^n, \dots, f \circ d_n^n) \end{aligned}$$

は全単射である.

証明 命題 1.7 より, 集合

$$\begin{aligned} X &:= \left\{ \bar{f} \in \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}} \left(\prod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1}, K \right) \mid \bar{f} \circ u = \bar{f} \circ v \right\} \\ &= \left\{ \bar{f} \in \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}} \left(\prod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1}, K \right) \mid \forall [m] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}}), \forall ((i < j), \alpha) \in \prod_{0 \leq k < l \leq n} \Delta^{n-2}([m]), \right. \\ &\quad \left. \bar{f}_{[m]}(j, d_i^{n-1} \circ \alpha) = \bar{f}_{[m]}(i, d_{j-1}^{n-1} \circ \alpha) \right\} \end{aligned}$$

の任意の元 \bar{f} に対してコイコライザの普遍性の可換図式

$$\begin{array}{ccc} \prod_{0 \leq i < j \leq n} \Delta^{n-2} & \xrightarrow[u]{v} & \prod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1} \xrightarrow{q} \partial\Delta^n \\ & & \searrow \bar{f} \quad \downarrow \exists! f \\ & & K \end{array}$$

が成り立つ. i.e. 写像

$$\begin{aligned} \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(\partial\Delta^n, K) &\longrightarrow X, \\ f &\longmapsto f \circ w = \left\{ ((f_{[m]} \circ d_k^n)_*)_{0 \leq k \leq n} : \prod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1}([m]) \longrightarrow K_m \right\}_{[m] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}})} \end{aligned}$$

は全単射である. 命題 1.1-(2) と 米田の補題 から

$$\text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}} \left(\prod_{0 \leq k \leq n} \Delta^{n-1}, K \right) \cong \prod_{0 \leq k \leq n} \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(\Delta^{n-1}, K) \cong \prod_{0 \leq k \leq n} K_{n-1}$$

が言えるので, 示された.

■

命題 1.8: コイコライザとしての角

角 Λ_i^n は圏 $\mathbf{SimpSet}$ における **コイコライザ** である:

$$\prod_{\substack{j, k \in [n] \setminus \{i\} \\ j < k}} \Delta^{n-2} \xrightarrow[u]{v} \prod_{l \in [n] \setminus \{i\}} \Delta^{n-1} \xrightarrow{w} \Lambda_i^n$$

証明 命題 1.7 とほぼ同様である. ■

系 1.4: 角の公式

$\forall K \in \text{Ob}(\mathbf{SimpSet})$ に対して, 写像

$$\text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(\Lambda_i^n, K) \longrightarrow \left\{ (\sigma_0, \dots, \sigma_{i-1}, \sigma_{i+1}, \dots, \sigma_n) \in \prod_{k \in [n] \setminus \{i\}} K_{n-1} \mid \begin{array}{l} \forall j, k \in [n] \setminus \{i\} \text{ s.t. } j < k, \\ \partial_j^{n-1}(\sigma_k) = \partial_{k-1}^{n-1}(\sigma_j) \end{array} \right\},$$

$$f \longmapsto (f \circ d_0^n, \dots, f \circ d_{i-1}^n, f \circ d_{i+1}^n, \dots, f \circ d_n^n)$$

は全単射である.

証明 ■

命題 1.9: 角と背骨の幾何学的実現

幾何学的実現は角, 背骨を保つ.

証明 $|\Delta^n| = \Delta_{\text{top}}^n$ であることに注意する. ■

1.3 脈体・Kan 複体・ $(\infty, 1)$ -圏

$[n] \in \text{Ob}(\Delta)$ に対して,

- $\forall i \in [n]$ を対象とする
- Hom 集合は

$$\text{Hom}_{[n]}(i, j) := \begin{cases} \{\text{pt}_{ij}\}, & i \leq j \\ \emptyset, & i > j \end{cases}$$

とする. ただし, $\text{pt}_{ii} = \text{Id}_i$ である.

- 射の合成は $0 \leq i \leq j \leq k \leq n$ に対して

$$\text{pt}_{jk} \circ \text{pt}_{ij} := \text{pt}_{ik}$$

と定義する.

ことにより $[n]$ 自身が圏になる.

定義 1.24: 脈体

圏 \mathcal{C} の脈体 (nerve) とは, 以下で定義される単体的集合

$$N(\mathcal{C}): \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

のことを言う:

- $\forall [n] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}})$ に対して

$$N(\mathcal{C})([n]) = \text{Fun}([n], \mathcal{C})$$

を対応付ける

- 圏 Δ^{op} における任意の射 $[n] \xrightarrow{\alpha} [m]$ に対して写像

$$N(\mathcal{C})(\alpha) := \alpha^*: \text{Fun}([n], \mathcal{C}) \longrightarrow \text{Fun}([m], \mathcal{C}), \\ X \longmapsto X \circ \alpha$$

を対応付ける

脈体関手 (nerve functor) とは, 以下で定義される関手

$$N: \mathbf{Cat} \longrightarrow \mathbf{SimpSet}$$

のことを言う:

- $\forall \mathcal{C} \in \text{Ob}(\mathbf{Cat})$ に対して $N(\mathcal{C}) \in \text{Ob}(\mathbf{SimpSet})$ を対応づける.
- 任意の関手 $\mathcal{C} \xrightarrow{F} \mathcal{D}$ に対して自然変換

$$N(F): N(\mathcal{C}) \Longrightarrow N(\mathcal{D}), \\ \text{w/ } N(F) := \{N(F)_{[n]}: \text{Fun}([n], \mathcal{C}) \longrightarrow \text{Fun}([n], \mathcal{D}), X \longmapsto F \circ X\}_{[n] \in \text{Ob}(\Delta^{\text{op}})}$$

を対応付ける

定義 1.20 の略記に倣い, $N(\mathcal{C})_n := N(\mathcal{C})([n]) \in \text{Ob}(\mathbf{Sets})$ と略記する. このとき, 圏 $[n]$ の定義を思い出すと, 集合の要素 $X \in N(\mathcal{C})_n$ は以下のデータからなる:

- 圏 \mathcal{C} の対象の族

$$\{X_i := X(i) \in \text{Ob}(\mathcal{C})\}_{0 \leq i \leq n}$$

- 圏 \mathcal{C} の射の族

$$\{f_{ij} := X(\text{pt}_{ij}): X(i) \longrightarrow X(j)\}_{0 \leq i \leq j \leq n}$$

$X: [n] \longrightarrow \mathcal{C}$ は関手であるから, $0 \leq i < j \leq n$ に対して

$$f_{ii} = X(\text{Id}_i) = \text{Id}_{X_i}, \\ f_{ij} = X(\text{pt}_{j-1,j} \circ \cdots \circ \text{pt}_{i+1,i+2} \circ \text{pt}_{i,i+1}) \\ = f_{j-1,j} \circ \cdots \circ f_{i+1,i+2} \circ f_{i,i+1}$$

が成り立つ。故に、 X を特徴付けるには、 $f_i := f_{i,i-1}$ とおいて \mathcal{C} の図式

$$X_0 \xrightarrow{f_1} X_1 \xrightarrow{f_2} \cdots \xrightarrow{f_n} X_n \quad (1.3.1)$$

を指定することが必要十分である。このことから、脈体の morphism-morphism 対応は図式の対応

$$(X_0 \rightarrow X_1 \rightarrow \cdots \rightarrow X_n) \mapsto (X_{\alpha(0)} \rightarrow X_{\alpha(1)} \rightarrow \cdots \rightarrow X_{\alpha(m)})$$

と理解できる。

【例 1.3.1】面写像

$\forall X \in N(\mathcal{C})_n$ を \mathcal{C} の図式

$$X_0 \xrightarrow{f_1} X_1 \xrightarrow{f_2} \cdots \xrightarrow{f_n} X_n$$

として指定する。このとき面写像 $d_i^n \in \text{Hom}_{\Delta^{\text{op}}}([n], [n-1])$ は、脈体によって写像

$$N(\mathcal{C})(d_i^n): X \mapsto (X_0 \xrightarrow{f_1} \cdots \xrightarrow{f_{i-1}} X_{i-1} \xrightarrow{f_{i+1} \circ f_i} X_{i+1} \xrightarrow{f_{i+2}} \cdots \xrightarrow{f_n} X_n)$$

と対応付く。

【例 1.3.2】縮退写像

$\forall X \in N(\mathcal{C})_n$ を \mathcal{C} の図式

$$X_0 \xrightarrow{f_1} X_1 \xrightarrow{f_2} \cdots \xrightarrow{f_n} X_n$$

として指定する。このとき縮退写像 $s_i^n \in \text{Hom}_{\Delta^{\text{op}}}([n], [n+1])$ は、脈体によって写像

$$N(\mathcal{C})(s_i^n): X \mapsto (X_0 \xrightarrow{f_1} \cdots \xrightarrow{f_i} X_i \xrightarrow{\text{Id}_{X_i}} X_i \xrightarrow{f_{i+1}} \cdots \xrightarrow{f_n} X_n)$$

と対応付く。

命題 1.10: 脈体関手は忠実充満

脈体関手は忠実充満関手である。

証明

$$\theta: \text{Hom}_{\text{Cat}}(\mathcal{C}, \mathcal{D}) \longrightarrow \text{Hom}_{\text{SimpSet}}(N(\mathcal{C}), N(\mathcal{D})), F \longmapsto N(F)$$

が全単射であることを示せば良い。

単射

関手 $F, G: \mathcal{C} \longrightarrow \mathcal{D}$ が $N(F) = N(G)$ を満たすとする。(1.3.1) により \mathcal{C} における任意の図式

$$X \xrightarrow{f} Y$$

を $N(\mathcal{C})_1$ の元と見做すことができるが、仮定より圏 \mathcal{D} において

$$\begin{aligned} N(F)_{[1]}(X \xrightarrow{f} Y) &= N(G)_{[1]}(X \xrightarrow{f} Y) \\ \iff (F(X) \xrightarrow{F(f)} F(Y)) &= (G(X) \xrightarrow{G(f)} G(Y)) \end{aligned}$$

が成り立つ. i.e. $F = G$ である.

全射

$\forall f \in \text{Hom}_{\text{SimpSet}}(N(\mathcal{C}), N(\mathcal{D}))$ を 1 つ固定する. f は自然変換だから, $\forall n \geq 0$ に対して自然変換 $f_{[n]}: N(\mathcal{C})_n \rightarrow N(\mathcal{D})_n$ が定まる. (1.3.1) より $\forall X, Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ を $N(\mathcal{C})_0$ の要素と見做し, 圏 \mathcal{C} における任意の射 $X \xrightarrow{u} Y$ を $N(\mathcal{C})_1$ の要素と見做すことができる. すると自然変換 f により

$$f_{[0]}(X), f_{[0]}(Y) \in \text{Ob}(\mathcal{D})$$

が対応付く. その上 f が自然変換であることから面写像 $d_i^1: [0] \rightarrow [1]$ との間に可換図式

$$\begin{array}{ccc} N(\mathcal{C})_1 & \xrightarrow{f_{[1]}} & N(\mathcal{D})_1 \\ \downarrow N(\mathcal{C})(d_i^1) = \partial_i^1 & & \downarrow N(\mathcal{D})(d_i^1) = \partial_i^1 \\ N(\mathcal{C})_0 & \xrightarrow{f_{[0]}} & N(\mathcal{D})_0 \end{array}$$

が成り立つ. よって

$$\begin{aligned} \partial_0^1 \circ f_{[1]}(X \xrightarrow{u} Y) &= f_{[0]} \circ \partial_0^1(X \xrightarrow{u} Y) \\ &= f_{[0]}(Y), \\ \partial_1^1 \circ f_{[1]}(X \xrightarrow{u} Y) &= f_{[0]} \circ \partial_1^1(X \xrightarrow{u} Y) \\ &= f_{[0]}(X) \end{aligned}$$

が言える. i.e. $f_{[1]}(u)$ は圏 \mathcal{D} における射 $f_{[0]}(X) \xrightarrow{f_{[1]}(u)} f_{[0]}(Y)$ である. ここで, 対応 $F_f: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ を

- $\forall X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ に対して $f_{[0]}(X) \in \text{Ob}(\mathcal{D})$ を対応付ける
- $X \xrightarrow{u} Y$ に対して $f_{[0]}(X) \xrightarrow{f_{[1]}(u)} f_{[0]}(Y)$ を対応付ける

ものとして定義する. もし F_f が関手ならば明らかに $\theta(F_f) = f$ であるから, F_f が関手であることを示せば良い:

(fun-1)

(1.3.1) により圏 \mathcal{C} における図式

$$X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z$$

を $N(\mathcal{C})_2$ の要素と見做すことができる. f は自然変換なので, 面写像 $d_i^2: [2] \rightarrow [1]$ について可換図式

$$\begin{array}{ccc} N(\mathcal{C})_2 & \xrightarrow{f_{[2]}} & N(\mathcal{D})_2 \\ \downarrow N(\mathcal{C})(d_i^2) = \partial_i^2 & & \downarrow N(\mathcal{D})(d_i^2) = \partial_i^2 \\ N(\mathcal{C})_1 & \xrightarrow{f_{[1]}} & N(\mathcal{D})_1 \end{array}$$

が成り立つ. よって

$$\begin{aligned}
\partial_0^2 \circ f_{[2]}(X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z) &= f_{[1]} \circ \partial_0^2(X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z) \\
&= f_{[1]}(Y \xrightarrow{v} Z) \\
&= (F_f(Y) \xrightarrow{F_f(v)} F_f(Z)), \\
\partial_2^2 \circ f_{[2]}(X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z) &= f_{[1]} \circ \partial_2^2(X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z) \\
&= f_{[1]}(X \xrightarrow{u} Y) \\
&= (F_f(X) \xrightarrow{F_f(u)} F_f(Y))
\end{aligned}$$

が分かった. i.e.

$$f_{[2]}(X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z) = (F_f(X) \xrightarrow{F_f(u)} F_f(Y) \xrightarrow{F_f(v)} F_f(Z))$$

である. 故に

$$\begin{aligned}
(F_f(X) \xrightarrow{F_f(v) \circ F_f(u)} F_f(Y)) &= \partial_1^2 \circ f_{[2]}(X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z) \\
&= f_{[1]} \circ \partial_1^2(X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z) \\
&= f_{[1]}(X \xrightarrow{v \circ u} Z) \\
&= (F_f(X) \xrightarrow{F_f(v \circ u)} F_f(Y))
\end{aligned}$$

i.e.

$$F(v \circ u) = F(v) \circ F(u)$$

が示された.

(fun-2)

f が自然変換なので縮退写像 $s_0^0: [1] \rightarrow [0]$ について可換図式

$$\begin{array}{ccc}
N(\mathcal{C})_1 & \xrightarrow{f_{[1]}} & N(\mathcal{D})_1 \\
\uparrow N(\mathcal{C})(s_0^0) = \sigma_0^0 & & \uparrow N(\mathcal{D})(s_0^0) = \sigma_0^0 \\
N(\mathcal{C})_0 & \xrightarrow{f_{[0]}} & N(\mathcal{D})_0
\end{array}$$

が成り立つ. (1.3.1) を使うと, これは $\forall X \in \text{Ob}(\mathcal{C}) = N(\mathcal{C})_0$ に対して

$$\begin{aligned}
f_{[1]} \circ \sigma_0^0(X) &= f_{[1]}(X \xrightarrow{\text{Id}_X} X) \\
&= (F_f(X) \xrightarrow{F_f(\text{Id}_X)} F_f(X)) \\
&= \sigma_0^0 \circ f_{[0]}(X) \\
&= (F_f(X) \xrightarrow{\text{Id}_{F_f(X)}} F_f(X))
\end{aligned}$$

を意味するので

$$F_f(\text{Id}_X) = \text{Id}_{F_f(X)}$$

が示された.

■

定義 1.25: Kan 複体

Kan 複体 (Kan complex) とは, 単体的集合

$$K: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

であって以下の性質を充たすもののこと:

(Kan)

$\forall n \geq 1, 0 \leq \forall j \leq n$ および $\forall f \in \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(\Lambda_j^n, K)$ に対して, 以下の図式を可換にする自然変換 $u \in \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(\Delta^n, K)$ が存在する:

$$\begin{array}{ccc} \Lambda_j^n & \xrightarrow{f} & K \\ \downarrow & \nearrow u & \\ \Delta^n & & \end{array}$$

単体的集合であって, 内部角 i.e. $\forall n \geq 2, 0 < \forall j < n$ についてのみ (Kan) を充たすもののことを弱 Kan 複体 (weak Kan complex) と呼ぶ.

定義 1.26: ∞ -圏

- $(\infty, 1)$ -圏とは, 単体的集合であって弱 Kan 複体になっているものを言う. $(\infty, 1)$ -圏の関手とは, $\mathbf{SimpSet}$ の射のこと.
- ∞ -groupoid とは, 単体的集合であって Kan 複体になっているもの

! 以下では $(\infty, 1)$ -圏のことを ∞ -圏と呼ぶ.

定理 1.5: Kan 条件と脈体

任意の単体的集合 $K: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ に対して以下は同値である:

- (1) K は弱 Kan 条件を充たす一意解を持つ
- (2) K は背骨の包含 $I^n \hookrightarrow \Delta^n$ を一意に持ち上げる.
- (3) K はある圏の脈体と同型である.

証明 [?, p.20, Theorem 1.1.52] を参照. ■

命題 1.11: 脈体が ∞ -groupoid になる必要十分条件

圏 \mathcal{C} の脈体が ∞ -groupoid になる必要十分条件は, \mathcal{C} が groupoid であること.

証明 [?, p.23, Lemma 1.1.54] ■

1.3.1 単体的ホモトピー

単体的集合の圏 **SimpSet** はモノイダル圏の構造を持つ．実際，単体的集合 $S, T: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$ に対して，新たな単体的集合

$$S \otimes T: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}, [n] \longmapsto S_n \times T_n$$

がテンソル積 $\otimes: \mathbf{SimpSet} \times \mathbf{SimpSet} \longrightarrow \mathbf{SimpSet}$ を定めている．

定義 1.27: 単体的ホモトピー

$X, Y, K \in \text{Ob}(\mathbf{SimpSet})$ を， K が X の単体的部分集合となるようにとる．包含射 $i: K \hookrightarrow X$ をとる．

- $f, g \in \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(X, Y)$ を繋ぐホモトピーとは，**SimpSet** の射 $\eta \in \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(X \times \Delta^1, Y)$ であって，以下の **SimpSet** の図式を可換にするもののこと：

$$\begin{array}{ccccc} X \cong X \times \Delta^0 & \xrightarrow{\text{Id} \times d_1^1} & X \times \Delta^1 & \xleftarrow{\text{Id} \times d_0^1} & X \times \Delta^0 \\ & \searrow f & \downarrow \eta & \swarrow g & \\ & & Y & & \end{array}$$

f, g を繋ぐホモトピーが存在するとき， f, g は互いにホモトピックであるという．

- $f \circ i = g \circ i =: \alpha$ とおく．ホモトピー $\eta \in \text{Hom}_{\mathbf{SimpSet}}(X \times \Delta^1, Y)$ が f と g の間の K に関する相対ホモトピー (homotopy from f to g (rel K)) であるとは，上の可換図式に加えて

$$\begin{array}{ccc} K \times \Delta^1 & \xleftarrow{i \times \text{Id}} & X \times \Delta^1 \\ \text{pr} \downarrow & & \downarrow \eta \\ K & \xrightarrow{\alpha} & Y \end{array}$$

が成り立つことを言う．

より具体的には， f, g を繋ぐ単体的ホモトピー (simplicial homotopy) とは **Sets** の射の族

$$\{h_i: X_n \longrightarrow Y_{n+1}\}_{i=0, \dots, n, n \geq 0}$$

であって以下を満たすもののこと：

$$\begin{aligned} \partial_0 \circ h_0 &= f_n, \\ \partial_{n+1} \circ h_n &= g_n, \\ \partial_i \circ h_j &= \begin{cases} h_{j-1} \circ \partial_i, & i < j \\ \partial_i \circ h_{i-1}, & i = j \neq 0 \\ h_j \circ \partial_{i-1}, & i > j + 1 \end{cases} \\ \sigma_i \circ h_j &= \begin{cases} h_{j+1} \circ \sigma_i, & i \leq j \\ h_j \circ \sigma_{i-1}, & i > j \end{cases} \end{aligned}$$

一見するとホモトピーと単体的ホモトピーは別のものに見えるが、実は同じものである。単体的ホモトピー $\{h_i: X_n \rightarrow Y_{n+1}\}_{i=0, \dots, n, n \geq 0}$ が与えられたとする。このとき **SimpSet** の射 $\eta \in \text{Hom}_{\text{SimpSet}}(X \times \Delta^1, Y)$ を

$$\begin{aligned}\eta_0 &:= \partial_0 \circ h_0, \\ \eta_{n+1} &:= \partial_{n+1} \circ h_n, \\ \eta_j &:= \partial_j \circ h_j \quad (1 \leq j \leq n)\end{aligned}$$

と定義すると、**和の普遍性**の図式によって $\eta \in \text{Hom}_{\text{SimpSet}}(X \times \Delta^1, Y)$ が定まる。

命題 1.12: ∞ -groupoid とホモトピー

$X, Y \in \text{Ob}(\text{SimpSet})$ が ∞ -groupoid ならば、**ホモトピック** は $\text{Hom}_{\text{SimpSet}}(X, Y)$ の上の同値関係になる。ホモトピック ($\text{rel } K \subset X$) も同値関係である。

証明 [?, p.26, COROLLARY 6.2] ■

∞ -groupoid X を与え、 $* \in X_0$ を1つ固定する。このとき集合としての同型

$$\text{Hom}_{\text{SimpSet}}((\Delta^n, \partial\Delta^n), (X, *)) \cong \{x \in X_n \mid 0 \leq \forall i \leq n, \partial_i^n(x) = \sigma_0^{n-2} \circ \dots \circ \sigma_0^0(*)\} =: Z_n(X, *)$$

がある [?]. $a, b \in X_n$ を繋ぐ**ホモトピー**とは、この場合 $y \in X_{n+1}$ であって

$$\partial_i^{n+1}(y) = \begin{cases} \sigma_0^{n-1} \circ \dots \circ \sigma_0^0(*), & i < n \\ a, & i = n \\ b, & i = n+1 \end{cases}$$

を満たすもののことである。ホモトピック \sim は $Z_n(X, *)$ 上の同値関係になる [?, p.27, Lemma 3.28].

$a, b \in Z_n(X, *)$ に対して、系 1.4, 命題 1.5-(1) および **Kan 条件**によって

$$\begin{array}{ccc} ((\sigma_0)^n(*), \dots, (\sigma_0)^n(*), a, b) & & \\ \Lambda_n^{n+1} \longrightarrow & X & \\ \downarrow & \nearrow \text{red dashed arrow} & \\ \Delta^{n+1} & & \end{array} \quad \text{red label: } \exists a \star b$$

として $a \star b \in X_{n+1}$ をとってくる。

$$\pi_n^\Delta(X, *) := \text{Hom}_{\text{SimpSet}}((\Delta^n, \partial\Delta^n), (X, *)) / \simeq \cong Z_n(X, *) / \sim$$

とおく。

命題 1.13: 単体的ホモトピー群

写像

$$\pi_n^\Delta(X, *) \times \pi_n^\Delta(X, *) \longrightarrow \pi_n^\Delta(X, *), ([a], [b]) \longmapsto [\partial_n^{n+1}(a \star b)]$$

によって $\pi_n^\Delta(X, *)$ は群になる。これを**単体的ホモトピー群**と呼ぶ。

証明

定理 1.6: 単体的ホモトピー群と幾何学的実現

$$\pi_n^\Delta(X, *) \cong \pi_n(|X|, |*|)$$

証明 [?, p.64, PROPOSITION 11.1]

定義 1.28: homotopy coherent な脈体

1.3.2 ∞ -トポス

∞ -groupoid のなす圏を $\infty\mathbf{Grpd}$ と書く.

定義 1.29: ∞ -前層

K を $(\infty, 1)$ -圏とする. K 上の $(\infty, 1)$ -前層とは, $(\infty, 1)$ -圏の関手

$$P: K^{\mathrm{op}} \longrightarrow \infty\mathbf{Grpd}$$

のこと. $(\infty, 1)$ -前層のなす $(\infty, 1)$ -圏とは, $(\infty, 1)$ -圏の関手の圏

$$\mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(K) := \mathbf{Fun}_{(\infty, 1)}(K^{\mathrm{op}}, \infty\mathbf{Grpd})$$

のこと.

以降では, $(\infty, 1)$ -前層のことを ∞ -前層と呼ぶ.

命題 1.14: ∞ -前層の圏のモデル

\mathcal{C} を $\mathbf{SimpSet}$ -豊穠圏であって, \mathbf{Kan} 複体を \mathbf{Hom} 対象に持つものとする.

このとき homotopy coherent な脈体 \mathbf{N}_{hc} に対して

$$\mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathbf{N}_{\mathrm{hc}}(\mathcal{C})) \cong \mathbf{N}_{\mathrm{hc}}([C^{\mathrm{op}}, \mathbf{SimpSet}_{\mathrm{Quillen}}]_{\mathrm{proj}}^{\circ})$$

が成り立つ.

証明 <https://ncatlab.org/nlab/show/%28infinity%2C1%29-category+of+%28infinity%2C1%29-presheaves> を参照.

[?], [?, p.9] に従い $(\infty, 1)$ -トポスの定義を概観する^{*11}.

^{*11} ここでの定義は不完全なので, 詳細は [?], [?] などを参照.

定義 1.30: ∞ -トポス

K を $(\infty, 1)$ -圏とする.

K 上の $(\infty, 1)$ -トポスとは, $(\infty, 1)$ -前層のなす $(\infty, 1)$ -圏 $\mathrm{PSh}_{(\infty, 1)}(K)$ の部分 $(\infty, 1)$ -圏

$$i: \mathbf{H} \hookrightarrow \mathrm{PSh}_{(\infty, 1)}(K)$$

であって, 包含 $(\infty, 1)$ -関手 i が有限極限を保つ左随伴 $(\infty, 1)$ -関手

$$\begin{array}{ccc} & i & \\ \mathbf{H} & \xrightarrow{\quad} & \mathrm{PSh}_{(\infty, 1)}(K) \\ & \text{lex} & \end{array}$$

を持つようなもののこと.

もしくは, 余完全^aな $(\infty, 1)$ -圏 \mathbf{H} であって以下の公理を充たすもののこと [?, p.9, Definition 5.4] :

(T1) $\forall f \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{H}}(X, Y)$ および \mathbf{H} における図式 $D: I \longrightarrow \mathbf{H}_Y$ において, 自然な同型

$$\mathrm{colim}_{i \in I} (X \times_Y D(i)) \cong X \times_Y \mathrm{colim}_{i \in I} D(i)$$

がある^b.

(T2) $\forall X, Y \in \mathrm{Ob}(\mathbf{H})$ に対して, 図式 $Y \longleftarrow \emptyset \longrightarrow X$ の押し出し

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \longrightarrow & X \\ \downarrow & & \downarrow \\ Y & \longrightarrow & X \amalg Y \end{array}$$

は図式 $Y \longrightarrow X \amalg Y \longleftarrow X$ の引き戻しでもある. i.e. 任意の和が disjoint である.

(T3) \mathbf{H} における任意の groupoid object は delooping を持つ.

^a 正確には **presentable** [?, p.372, Def 5.0.18]

^b \times_Y は引き戻し

[?] は命題 1.14 を使って ∞ -トポスを定義している.

1.4 (∞, n) -圏

1.4.1 因子化ホモロジー

1.4.2 Complete Segal space

1.4.3 Theta space
