

# 第 1 章

## 層状化空間・因子化ホモロジー

[?], [?] のレビュー

### 1.1 conically smooth な層状化空間

#### 1.1.1 層状化空間

##### 定義 1.1: 半順序集合の位相

$(P, \leq)$  を半順序集合とする.  $P$  上の位相  $\mathcal{O}_{\leq} \subset 2^P$  を以下で定義する:

$$U \in \mathcal{O}_{\leq} \stackrel{\text{def}}{\iff} \forall x \in U, \forall y \in P, [x \leq y \implies y \in U]$$

実際, 空集合の定義から  $\emptyset \in \mathcal{O}_{\leq}$  であり,  $\forall U_1, U_2 \in \mathcal{O}_{\leq}$  に対して  $x \in U_1 \cap U_2$  であることは

$$\forall y \in P, x \leq y \implies y \in U_1 \text{ かつ } y \in U_2$$

と同値なので  $U_1 \cap U_2 \in \mathcal{O}_{\leq}$  であり, さらに勝手な開集合族  $\{U_{\lambda} \in \mathcal{O}_{\leq}\}_{\lambda \in \Lambda}$  に対して  $x \in \bigcup_{\lambda \in \Lambda} U_{\lambda}$  は

$$\exists \alpha \in \Lambda, \forall y \in P, x \leq y \implies y \in U_{\alpha} \subset \bigcup_{\lambda \in \Lambda} U_{\lambda}$$

と同値であるから  $\bigcup_{\lambda \in \Lambda} U_{\lambda} \in \mathcal{O}_{\leq}$  であり,  $\mathcal{O}_{\leq}$  は集合  $P$  の位相である.

##### 【例 1.1.1】 $[n]$ の位相

半順序集合  $[2] := \{0 \leq 1 \leq 2\}$  を考える. このとき, 位相  $\mathcal{O}_{\leq}$  とは

$$\mathcal{O}_{\leq} = \{\emptyset, \{2\}, \{1, 2\}, \{0, 1, 2\}\}$$

のことである. 同様に, 半順序集合  $[n] := \{0 \leq 1 \leq \dots \leq n\}$  に対して

$$\mathcal{O}_{\leq} = \{\emptyset, \{n\}, \{n-1, n\}, \dots, \{0, \dots, n\}\}$$

が成り立つ.

## 定義 1.2: 層状化空間・層状化写像

$(P, \leq)$  を半順序集合とし、定義 1.1 の位相を入れて位相空間にする。

このとき、位相空間  $X$  が  **$P$ -層状化**されている ( $P$ -stratified) とは、連続写像  $s: X \rightarrow P$  が存在することを言う<sup>a</sup>。組  $(X, s: X \rightarrow P)$  のことを  **$P$ -層状化空間** ( $P$ -stratified space) と呼ぶ。また、 $i \in P$  の逆像  $X_i := s^{-1}(\{i\}) \subset X$  のことを  **$i$ -層** ( $i$ -strata) と呼ぶ。

<sup>a</sup>  $s$  のことを、 $X$  の層状化 (stratification) と呼ぶ。

層状化空間  $(X, s: X \rightarrow P)$ ,  $(X', s': X' \rightarrow P')$  の間の**層状化写像** (stratified map) とは、連続写像の組み  $(f: X \rightarrow X', \tilde{f}: P \rightarrow P')$  であって以下の図式を可換にするもののこと：

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & X' \\ s \downarrow & & \downarrow s' \\ P & \xrightarrow{\tilde{f}} & P' \end{array}$$

### 【例 1.1.2】 $[n]$ -層状化空間

半順序集合  $[n] := \{0 \leq \dots \leq n\}$  に対して【例 1.1.1】の位相を入れる。まず、

$$X_0 = s^{-1}([n] \setminus \{1, \dots, n\})$$

でかつ  $\{1, \dots, n\}$  は  $[n]$  の開集合であるから、 $s$  の連続性から  $X$  の部分空間  $X_0 \subset X$  は閉集合だとわかる。さらに

$$\begin{aligned} X_0 \cup X_1 &= s^{-1}([n] \setminus \{2, \dots, n\}), \\ X_0 \cup X_1 \cup X_2 &= s^{-1}([n] \setminus \{3, \dots, n\}), \\ &\vdots \\ X_0 \cup \dots \cup X_n &= X \end{aligned}$$

が成り立つことから、 $s$  の連続性より  $X$  の部分空間  $X_0 \cup \dots \cup X_{m \leq n}$  は閉集合だと分かる。

### 【例 1.1.3】CW 複体

CW 複体  $X$  を与える。 $X_{\leq k}$  を  $X$  の  $k$ -骨格とすると、 $X_k \setminus X_{k-1}$  を  $k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$  に写す写像  $s: X \rightarrow \mathbb{Z}_{\geq 0}$  は  $X$  の層状化を与える。

直観的には、層状化空間とは defect 付き位相多様体の一般化である。特に  $X$  を位相多様体とすると、 $[n]$ -層状化空間  $(X, s: X \rightarrow [n])$  の  $i$ -層  $X_i$  とは、多様体  $X$  上の余次元  $d-i$  の defect を全て集めてきたものだと見做せる。

### 定義 1.3: 層状化開埋め込み

**層状化写像**  $(f, \tilde{f}): (X, s: X \rightarrow P) \rightarrow (X', s': X' \rightarrow P')$  が**層状化開埋め込み** (stratified open embedding) であるとは、以下の3条件を満たすことを言う:

- (1) 連続写像  $f: X \rightarrow X'$  は位相的開埋め込みである<sup>a</sup>
- (2) 連続写像  $\tilde{f}: P \rightarrow P'$  は位相的開埋め込みである.
- (3)  $\forall p \in P$  に対して,  $f$  の  $p$ -strata への制限<sup>b</sup>

$$f|_{X_p}: X_p \rightarrow X'_{\tilde{f}(p)}$$

は位相的開埋め込みである.

<sup>a</sup> i.e.  $f: X \rightarrow f(X)$  が同相写像かつ  $f(X) \subset Y$  が開集合

<sup>b</sup> **層状化写像**の定義に登場する図式の可換性より,  $\forall x \in X_p$  に対して  $s'(f(x)) = s' \circ f(x) = \tilde{f} \circ s(x) = \tilde{f}(p)$ , i.e.  $f(x) \in s'^{-1}(\{\tilde{f}(p)\}) = X'_{\tilde{f}(p)}$  が分かる.

!

以下では混乱が生じにくい場合, **層状化空間**  $(X, s: X \rightarrow P)$  のことを  $(X \xrightarrow{s} P)$  や  $(X \rightarrow P)$  と略記する. さらに, **層状化写像**  $(f, \tilde{f}): (X, s: X \rightarrow P) \rightarrow (X', s': X' \rightarrow P')$  のことを  $f: (X \rightarrow P) \rightarrow (X' \rightarrow P')$  と略記し, 連続写像  $\tilde{f}: P \rightarrow P'$  のことも  $f$  と書く場合がある.

### 定義 1.4: 層状化空間と層状化開埋め込みの成す $(1, 1)$ 圏

$(1, 1)$ -圏 **StTop** を,

- 第2可算な Hausdorff 空間であるような**層状化空間**を対象とする
- **層状化開埋め込み**を射とする

ことで定義する.

#### 1.1.2 $C^0$ 級層状化空間

### 定義 1.5: コーン

**層状化空間**  $(X \xrightarrow{s} P)$  を与える.  $X$  の**コーン** (cone) とは, 以下のようして構成される**層状化空間**  $(C(X), C(s): C(X) \rightarrow C(P))$  のこと:

- 位相空間  $C(X)$  を, 押し出し位相空間

$$C(X) := \{\text{pt}\} \amalg_{\{0\} \times X} (\mathbb{R}_{\geq 0} \times X)$$

と定義する:

$$\begin{array}{ccc} \{0\} \times X & \xleftarrow{\{0\} \times \text{id}_X} & \mathbb{R}_{\geq 0} \times X \\ \downarrow & & \downarrow \\ \{\text{pt}\} & \xrightarrow{\quad} & \{\text{pt}\} \amalg_{\{0\} \times X} (\mathbb{R}_{\geq 0} \times X) \end{array}$$

- 半順序集合  $C(P)$  を,  $P$  に最小の要素  $-\infty$  を付け足すことで定義する. これは半順序集合の圏における押し出し

$$C(P) := \{-\infty\} \amalg_{\{0\} \times P} ([1] \times P)$$

である.

- 連続写像

$$\begin{aligned} \mathbb{R}_{\geq 0} \times X &\longrightarrow [1] \times P, \\ (t, x) &\longmapsto \begin{cases} (0, s(x)), & t = 0, \\ (1, s(x)), & t > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

が誘導する連続写像  $C(X) \longrightarrow C(P)$  を  $C(s)$  と書く.

位相空間の圏における押し出しの公式から, 位相空間  $C(X)$  とは

$$\begin{aligned} i_1: \{0\} \times X &\longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \times X, \quad x \longmapsto (0, x), \\ i_2: \{0\} \times X &\longrightarrow \{\text{pt}\}, \quad x \longmapsto \text{pt} \end{aligned}$$

とおいたときのコイコライザ

$$\{0\} \times X \xrightarrow[i_2]{i_1} \{\text{pt}\} \sqcup (\mathbb{R}_{\geq 0} \times X) \xrightarrow{q} C(X),$$

i.e. 商位相空間

$$\frac{\mathbb{R}_{\geq 0} \times X}{i_1(x) \sim i_2(x)} = \frac{\mathbb{R}_{\geq 0} \times X}{\{0\} \times X}$$

のこと. 従って  $C(s): C(X) \longrightarrow C(P)$  とは, 連続写像<sup>\*1</sup>

$$\frac{\mathbb{R}_{\geq 0} \times X}{\{0\} \times X} \longrightarrow C(P), \quad [(t, x)] \longmapsto \begin{cases} -\infty, & t = 0 \\ s(x), & t > 0 \end{cases}$$

のことである.



以下では, 混乱の恐れがない限り **層状化空間**  $(X \xrightarrow{s} P)$  の **コーン** を  $C(X \xrightarrow{s} P)$  と略記する. さらに, 1 点  $[0, *] \in C(Z)$  のことを **コーンポイント** と呼び,  $\text{pt}$  と略記する.

素材となる層状化空間  $(Z \xrightarrow{s} P)$  が連結でなくとも, 位相空間  $C(Z)$  においてはコーンポイントを経由することができるので, 弧状連結になる.

<sup>\*1</sup>  $C(P)$  の位相  $\mathcal{O}_{C(P)}$  は,  $P$  の位相  $\mathcal{O}_P$  に 1 つの開集合  $\{-\infty\} \cup P$  を加えたものである.  $\forall U \in \mathcal{O}_P$  に対して  $C(s)^{-1}(U) = \mathbb{R}_{>0} \times s^{-1}(U) \in \mathcal{O}_{C(X)}$  で, かつ  $C(s)^{-1}(\{-\infty\} \cup P) = C(X) \in \mathcal{O}_{C(X)}$  なので  $C(s)$  は連続である.

### 補題 1.1: 層状化空間のコーンは連結

層状化空間  $(Z \xrightarrow{s} P)$  のコーン  $C(Z \xrightarrow{s} P)$  において, 位相空間  $C(Z)$  は弧状連結である<sup>a</sup>.

<sup>a</sup> 従って連結でもある

**証明**  $Z$  を弧状連結成分の disjoint union に分割し,  $Z = \coprod_{i \in \pi_0(Z)} Z_i$  と書く. いま, 位相空間  $C(Z)$  の互いに相異なる 2 点  $[t_i, z_i], [t_j, z_j] \in C(Z)$  を任意にとる. ただし  $z_i \in Z_i, z_j \in Z_j$  とする.

$i = j$  ならば,  $z_i$  と  $z_j$  を繋ぐ  $Z_i = Z_j$  上の連続曲線  $\varphi: [0, 1] \rightarrow Z_i$  が存在する. よって連続写像

$$\bar{\varphi}: [0, 1] \rightarrow C(Z), s \mapsto [(1-s)t_i + st_j, \varphi(s)]$$

が  $[t_i, z_i], [t_j, z_j]$  を繋ぐ.

$i \neq j$  とする. このとき,  $C(Z)$  上の連続曲線

$$\begin{aligned} \varphi_i: [0, 1] &\rightarrow C(Z), s \mapsto [(1-s)t_i, z_i] \\ \varphi_j: [0, 1] &\rightarrow C(Z), s \mapsto [(1-s)t_j, z_j] \end{aligned}$$

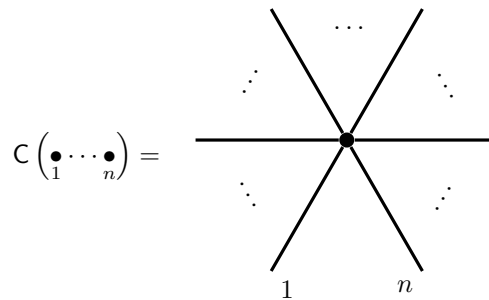
はそれぞれ  $[t_i, z_i], [t_j, z_j]$  とコーンポイント  $\text{pt} = [0, *] \in C(Z)$  を繋ぐ. 故に  $\varphi_i$  と  $\varphi_j^{-1}$  を繋ぎ合わせて得られる  $C(Z)$  上の連続曲線

$$\varphi_i * \varphi_j^{-1}: [0, 1] \rightarrow C(Z), s \mapsto \begin{cases} \varphi_i(2s), & s \in [0, \frac{1}{2}] \\ \varphi_j(2-2s), & s \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases}$$

がちょうど  $[t_i, z_i], [t_j, z_j]$  を繋ぐ. ■

#### 【例 1.1.4】次元 1 のコーン

次元 0 のコンパクトな層状化空間とは, 有限個の点の disjoint union のことである. これらのコーンを図示すると,

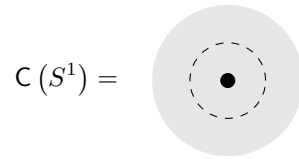


のようになる. ただし, コーンポイントは中心の点である.

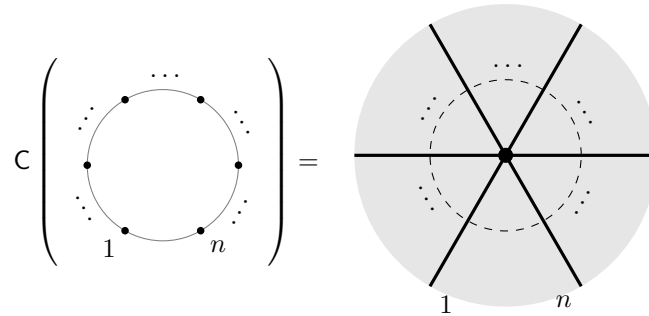
#### 【例 1.1.5】次元 2 のコーン

次元 1 のコンパクトな層状化空間とは, 閉じた非空な無向グラフのことである. 特に, 頂点のない連結かつコンパクトな無向グラフは  $S^1$  と同相であり, これのコーンをとることで得られる 2 次元の層

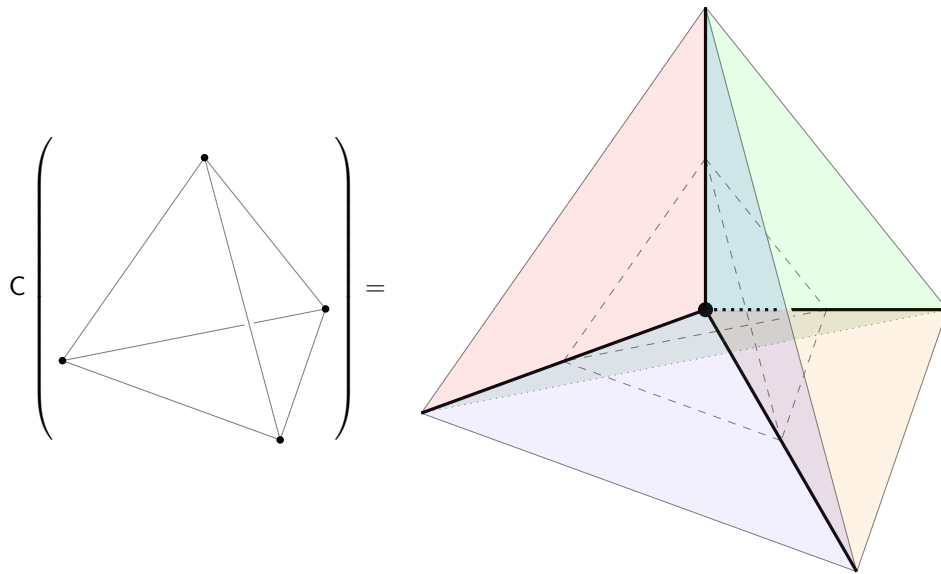
状態空間は次のように図示できる：



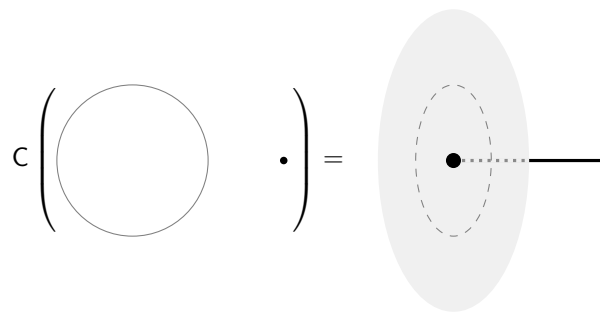
さらに、 $n$  個の頂点が付いた  $S^1$  のコーンを図示すると次のようになる：



他にも、例えば 4 面体の 1-骨格のコーンを図示すると次のようになる：



なお、 $C(Z \xrightarrow{s} P)$  において、 $Z$  の連結成分毎の次元が互いに異なる場合を考えることもできる。例えば  $Z = S^1 \amalg \{\text{pt}\}$  のとき、



のように図示できる.

### 定義 1.6: $C^0$ 級層状化空間

以下を充たす **StTop** の充満部分圏  $\mathcal{T}$  のうち最小のものを  $\bigcap_{\mathcal{T}} \mathcal{T} \subset \mathbf{StTop}$  と書く:

**(Snglr-1)**  $(\emptyset \rightarrow \emptyset) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$

**(Snglr-2)**

$(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$  かつ  $X, P$  が位相空間としてコンパクト  
 $\implies C(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$

**(Snglr-3)**

$(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathcal{T}) \implies (X \times \mathbb{R} \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathcal{T})^a$

**(Snglr-4)**

$(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$  かつ  $\text{Hom}_{\mathbf{StTop}}((U \rightarrow P_U), (X \rightarrow P)) \neq \emptyset$   
 $\implies (U \rightarrow P_U) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$

**(Snglr-5)**

$(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{StTop})$  が開被覆  $\{(U_\lambda \rightarrow P_\lambda) \longrightarrow (X \rightarrow P)\}_{\lambda \in \Lambda}^b$  を持ち, かつ  $\forall \lambda \in \Lambda$  に  
 対して  $(U_\lambda \rightarrow P_\lambda) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$   
 $\implies (X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$

<sup>a</sup>  $X \times \mathbb{R}$  の層状化は, 連続写像  $X \times \mathbb{R} \longrightarrow X, (x, t) \longmapsto x$  を前もって合成することにより定める.

<sup>b</sup> i.e.  $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}, \{P_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$  が, それぞれ位相空間  $X, P$  の開被覆を成す.

(1, 1)-圏  $\bigcap_{\mathcal{T}} \mathcal{T}$  の対象のうち, 位相空間としてパラコンパクト<sup>a</sup>であるもの全体が成す充満部分圏を  $\mathbf{Snglr}^{C^0} \subset \bigcap_{\mathcal{T}} \mathcal{T} \subset \mathbf{StTop}$  と書く.  $\mathbf{Snglr}^{C^0}$  の対象を  $C^0$  級層状化空間 ( $C^0$  stratified space) と呼ぶ.

<sup>a</sup> この仮定により, 任意の  $C^0$  級層状化空間  $(X \rightarrow P)$  において位相空間  $X$  が完全正規 (completely normal/hereditarily normal) であることが分かる. この事実は被覆次元および深さを使用する際に有用である. 特に, 補題 1.10 の証明で暗に使用している.

### 【例 1.1.6】位相多様体は $C^0$ 級層状化空間

**(Snglr-1)** より,  $* := C(\emptyset \rightarrow \emptyset) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  である. **(Snglr-3)** より,  $\forall n \geq 0$  に対して  $\mathbb{R}^n = * \times (\mathbb{R}^n \rightarrow [0]) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  であることが帰納的に分かる.  $\mathbb{R}^n$  の任意の開集合  $U \hookrightarrow \mathbb{R}^n$  に対して,

$$\begin{array}{ccc} U & \hookrightarrow & \mathbb{R}^n \\ \downarrow & & \downarrow \\ [0] & \xrightarrow{=} & [0] \end{array}$$

は層状化埋め込みであり, 従って **(Snglr-4)** より  $U := (U \rightarrow [0]) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  が分かる. 以上の考察と **(Snglr-5)** を併せて, 任意の位相多様体  $M$  は<sup>a</sup>圏  $\mathbf{Snglr}^{C^0}$  の対象である.

<sup>a</sup> より正確には,  $M$  を層状化空間  $(M \rightarrow [0])$  と同一視している.

【例 1.1.6】の意味で,  $C^0$  級層状化空間は位相多様体の一般化と見做せる. しかしまだそこには  $C^\infty$  構造を一般化した構造は入っておらず,  $C^\infty$  多様体の一般化とは見做せない.

### 1.1.3 $C^0$ basic

#### 定義 1.7: $C^0$ basic

$C^0$  級層状化空間  $(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  が  $C^0$ -basic であるとは, ある  $n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$  およびコンパクトな  $C^0$  級層状化空間  $(Z \rightarrow Q) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  が存在して  $(X \rightarrow P) = (\mathbb{R}^n \rightarrow [0]) \times C(Z \rightarrow Q)$  が成り立つことを言う.

いま,  $C^0$  basic な  $(U \rightarrow P_U) = (\mathbb{R}^n \rightarrow [0]) \times C(Z \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  を 1 つとる. コーンの定義から,  $U$  の点を  $(v, [t, z]) \in \mathbb{R}^n \times \frac{\mathbb{R}_{>0} \times Z}{\{0\} \times Z}$  と表示することができる. この表示の下で自己同相

$$\begin{aligned} \gamma: \mathbb{R}_{>0} \times T\mathbb{R}^n \times C(Z) &\longrightarrow \mathbb{R}_{>0} \times T\mathbb{R}^n \times C(Z), \\ (t, (v, p), [s, z]) &\longmapsto (t, (tv + p, p), [ts, z]) \end{aligned} \quad (1.1.1)$$

を考える<sup>\*2</sup>.

さらに, もう 1 つの  $C^0$  basic な  $(U' \rightarrow P_{U'}) = (\mathbb{R}^{n'} \rightarrow [0]) \times C(Z' \rightarrow P') \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  および  $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}^{C^0}}((U \rightarrow P_U), (U' \rightarrow P_{U'}))$  をとる. ただし,  $f$  はコーンポイントをコーンポイントへ写す, i.e.  $f(\mathbb{R}^n \times \{\text{pt}\}) \in \mathbb{R}^{n'} \times \{\text{pt}\}$  が成り立つことを仮定する.  $f|_{\mathbb{R}^n}: \mathbb{R}^n \times \{\text{pt}\} \longrightarrow \mathbb{R}^{n'} \times \{\text{pt}\}$  を  $f$  のコーンポイントへの制限として,

$$\begin{aligned} f_\Delta: \mathbb{R}_{>0} \times T\mathbb{R}^n \times C(Z) &\longrightarrow \mathbb{R}_{>0} \times T\mathbb{R}^{n'} \times C(Z'), \\ (t, v, p, [s, z]) &\longmapsto (t, f|_{\mathbb{R}^n}(v), f(p, [s, z])) \end{aligned}$$

とおこう.

#### 【例 1.1.7】

$Z = Z' = \emptyset$  のとき,  $f$  とは単に連続関数  $f: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^{n'}$  のことである. このとき,

$$\begin{aligned} (\gamma^{-1} \circ f_\Delta \circ \gamma)(t, v, p) &= \gamma^{-1} \circ f_\Delta(t, tv + p, p) \\ &= \gamma^{-1}(t, f(tv + p), f(p)) \\ &= \left( t, \frac{f(tv + p) - f(p)}{t}, f(p) \right) \end{aligned}$$

と計算できるため,  $f$  が  $C^1$  級であることと  $\forall (v, p) \in T\mathbb{R}^n$  に対して  $t \rightarrow +0$  の極限, i.e.  $v$  に沿った片側方向微分が存在することは同値である.

<sup>\*2</sup> 接束  $T\mathbb{R}^n$  は  $\mathbb{R}^{2n}$  と微分同相である. [?, p.23] の記法に合わせて底空間  $\mathbb{R}^n$  の点を  $p$ ,  $p$  上のファイバーの元を  $v$  としたとき  $(v, p) \in T\mathbb{R}^n$  と書いた. 命題??の記法と順番が逆なので注意.



【例 1.1.7】をもとに、 $C^0$  basic な  $C^0$  級層状化空間の間の層状化開埋め込みの **conically smoothness** を定義する。  $C^\infty$  多様体の  $C^\infty$  構造の定義においては、チャート  $(U, \varphi: \mathbb{R}^n \rightarrow U)$ ,  $(V, \psi: \mathbb{R}^n \rightarrow V)$  の間の変換関数  $\psi^{-1} \circ \varphi: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  が  $C^\infty$  級であることを要請した。次の小節で **conically smooth structure** の定義を行うが、その際にチャートに対応するものは **basic**  $U = \mathbb{R}^n \times C(Z)$  から着目している  $C^0$ -級層状化空間  $X$  への層状化開埋め込み  $\varphi: U \hookrightarrow X$  であり、概ね<sup>\*3</sup>2つのチャート  $\varphi: U \hookrightarrow X$ ,  $\psi: V \hookrightarrow X$  の間の変換関数  $\psi^{-1} \circ \varphi: U \rightarrow V$  に対して **conically smooth (along  $\mathbb{R}^n$ )** であることを要請する。

#### 定義 1.8: $\mathbb{R}^n$ に沿って conically smooth

- $C^0$  basic な  $(U \rightarrow P_U) = (\mathbb{R}^n \rightarrow [0]) \times C(Z \rightarrow P) \in \text{Ob}(\text{Snglr}^{C^0})$
- $C^0$  basic な  $(U' \rightarrow P_{U'}) = (\mathbb{R}^{n'} \rightarrow [0]) \times C(Z' \rightarrow P') \in \text{Ob}(\text{Snglr}^{C^0})$
- $f \in \text{Hom}_{\text{Snglr}^{C^0}}((U \rightarrow P_U), (U' \rightarrow P_{U'}))$  であって、コーンポイントを保存するもの

を与える。このとき、 $f$  が  $\mathbb{R}^n$  に沿って  $C^1$  級 ( $C^1$  along  $\mathbb{R}^n$ ) であるとは、以下の図式を可換にする連続写像

$$\tilde{D}f: \mathbb{R}_{\geq 0} \times T\mathbb{R}^n \times C(Z) \longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \times T\mathbb{R}^{n'} \times C(Z')$$

が存在することを言う<sup>a</sup>：

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R}_{\geq 0} \times T\mathbb{R}^n \times C(Z) & \xrightarrow{\tilde{D}f} & \mathbb{R}_{\geq 0} \times T\mathbb{R}^{n'} \times C(Z') \\ \uparrow & & \uparrow \\ \mathbb{R}_{> 0} \times T\mathbb{R}^n \times C(Z) & \xrightarrow{\gamma^{-1} \circ f_\Delta \circ \gamma} & \mathbb{R}_{> 0} \times T\mathbb{R}^{n'} \times C(Z') \end{array}$$

<sup>a</sup> 写像  $\gamma^{-1} \circ f_\Delta \circ \gamma$  の連続性から、拡張  $\tilde{D}f$  は存在すれば一意かつ連続である。

このような拡張が存在するとき、第一変数を  $t = 0$  に制限して得られる連続写像を

$$Df: T\mathbb{R}^n \times C(Z) \longrightarrow T\mathbb{R}^{n'} \times C(Z')$$

と書く。  $f$  が  $\mathbb{R}^n$  に沿って  $C^r$  級であるとは、  $Df$  が  $\mathbb{R}^n$  に沿って  $C^{r-1}$  級であることを言う。  $f$  が  $\mathbb{R}^n$  に沿って **conically smooth** であるとは、  $\forall r \geq 1$  について  $C^r$  級であることを言う。

#### 1.1.4 conically smooth な層状化空間

次に行うべきは、与えられた  $C^0$  級層状化空間  $(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\text{Snglr}^{C^0})$  の上の **conically smooth structure** i.e. 変換関数が **conically smooth** であるような極大アトラスを定義することである。この手続きは、次で定義する次元と深さに関する帰納法によって構成される。

<sup>\*3</sup> コーンポイントをコーンポイントに写さない変換関数も存在しうるので、これだけではいけない。

### 定義 1.9: 被覆次元

$X$  を位相空間とする．以下の条件を満たす最小の  $d \in \mathbb{Z}_{\geq -1}$  のことを（存在すれば） $X$  の**被覆次元** (covering dimension) と呼び、 $\dim X$  と書く：

#### (covering)

$X$  の任意の開被覆  $\mathcal{U}$  に対して、十分細かい細分  $\mathcal{V}_{\mathcal{U}} \prec \mathcal{U}$  が存在して、任意の互いに異なる  $\forall m > d + 1$  個の開集合  $V_1, \dots, V_m \in \mathcal{V}_{\mathcal{U}}$  の共通部分が空になるようにできる．特に、 $\emptyset$  の被覆次元は  $-1$  と定義する．

点  $x \in X$  における**被覆次元**を以下で定義する：

$$\dim_x X := \inf \left\{ \dim U \geq -1 \mid x \in U \underset{\text{open}}{\subset} X \right\}$$

### 定義 1.10: 次元と深さ

空でない  **$C^0$  級層状化空間**  $(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\text{Snglr}^{C^0})$  を与える．

- $(X \rightarrow P)$  の点  $x \in X$  における**局所的次元** (local dimension) とは、点  $x$  における  $X$  の**被覆次元**  $\dim_x(X)$  のことを言う．
- $(X \rightarrow P)$  の**次元** (dimension) とは

$$\dim(X \rightarrow P) := \sup_{x \in X} \dim_x(X)$$

のこと．

- $(X \xrightarrow{s} P)$  の点  $x \in X$  における**局所的深さ** (local depth) とは、

$$\text{depth}_x(X \rightarrow P) := \dim_x(X) - \dim_x(X_{s(x)})$$

のこと．

- $(X \rightarrow P)$  の**深さ** (depth) とは、

$$\text{depth}(X \rightarrow P) := \sup_{x \in X} \text{depth}_x(X \rightarrow P)$$

のこと．ただし、 $\text{depth}(\emptyset) := -1$  と定義する．

#### 【例 1.1.8】コーンの深さ

$n$  次元位相多様体  $Z$  について、定義から  $\forall x \in Z$  に対して  $\dim_x(Z) = n$  が成り立つ． $Z$  を【例 1.1.6】により  **$C^0$  級層状化空間**  $(Z \xrightarrow{s} [0]) \in \text{Ob}(\text{Snglr}^{C^0})$  と見做すと、これの**コーン**  $C(Z \xrightarrow{s} [0])$  について

$$\text{depth}_x(C(Z \xrightarrow{s} [0])) = \begin{cases} n + 1, & x = \text{pt}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

であることがわかる．実際  $C(Z)_{C(s)(pt)} = \{pt\}$  であるが，1 点からなる位相空間の被覆次元は 0 次元なので  $\dim_{pt}(C(Z)_{C(s)(pt)}) = 0$  である．一方，コーンポイント以外の点  $x \in C(Z)$  に対して  $C(s)(x)$ -層は  $C(Z)_{C(s)(x)} = \mathbb{R}_{>0} \times Z \approx \mathbb{R} \times Z$  であるから， $\dim_x(C(Z)_{C(s)(x)}) = n + 1$  と計算できる<sup>a</sup>．

また， $\forall (X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  に対して

$$\begin{aligned} \dim((\mathbb{R}^m \rightarrow [0]) \times (X \rightarrow P)) &= m + \dim(X \rightarrow P), \\ \text{depth}((\mathbb{R}^m \rightarrow [0]) \times (X \rightarrow P)) &= \text{depth}(X \rightarrow P) \end{aligned}$$

が成り立つ．従って， $C^0$  basic な  $(U \rightarrow P_U) = (\mathbb{R}^n \rightarrow [0]) \times C(Z \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  に対して

$$\begin{aligned} \text{depth}(U \rightarrow P_U) &= \text{depth}(C(Z \rightarrow P)) \\ &= \dim(Z \rightarrow P) + 1 \end{aligned}$$

が成り立つ．

---

<sup>a</sup> さらに， $\forall x \in C(Z)$  に対して  $\dim_x C(Z) = n + 1$  である．

次元と深さに関する帰納法を実行する前に，構成したい (1, 1)-圏を表す記号の整理をしておこう：

- conically smooth チャートの素材となる，**basic** が成す圏

### Bsc

これは， $C^\infty$  多様体の圏  $\mathbf{Mfld}$  において  $\mathbb{R}^n$  ( $\forall n \geq -1$ ) 全体が成す充満部分圏に相当するものである．

- 与えられた  $C^0$  級層状化空間  $(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  に対して，その上に入る極大アトラス<sup>\*4</sup>全体が成す集合を返す前層

$$\text{Sm}: (\mathbf{Snglr}^{C^0})^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

この対応が前層であることの直観は，層状化開埋め込み  $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}^{C^0}}((X \rightarrow P), (Y \rightarrow Q))$  が与えられると， $(X \rightarrow P)$  上の極大アトラス  $\text{Sm}(X \rightarrow P)$  が  $(Y \rightarrow Q)$  上の極大アトラス  $\text{Sm}(Y \rightarrow Q)$  を「制限」する写像  $\text{Sm}(f): \text{Sm}(Y \rightarrow Q) \longrightarrow \text{Sm}(X \rightarrow P)$  によって得られるということである．

- 深さが  $k$  以下，かつ次元が  $n$  以下であるような  $C^0$  級層状化空間全体が成す  $\mathbf{Snglr}^{C^0}$  の充満部分圏を

$$\mathbf{Snglr}^{C^0}_{\substack{\leq k, \\ \text{depth} \quad \text{dimension}}} \leq n$$

と書く．同様に

$$\mathbf{Bsc}_{\leq k, \leq n}, \quad \text{Sm}_{\leq k, \leq n}: (\mathbf{Snglr}_{\leq k, \leq n}^{C^0})^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

と書く．

---

<sup>\*4</sup> 存在するか分からないし，存在したとして一意であるとは限らない．実際，例えば  $C^\infty$  多様体の段階においてさえ  $\mathbb{R}^4$  の上の極大アトラス (i.e.  $C^\infty$  構造) は非可算無限個存在する [?].

- conically smooth な層状化空間の圏

**Snglr**

これを作ることが本小節の最終目標である。

帰納法により,  $\forall k \geq -1$  に対して  $\mathbf{Bsc}_{\leq k, \leq \infty}$  および  $\mathbf{Sm}_{\leq k, \leq \infty}: (\mathbf{Snglr}_{\leq k, \leq \infty}^{C^0})^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}$  が構成される。

#### 定義 1.11: 帰納法の出発点

(Snglr-1) より  $(\emptyset \rightarrow \emptyset) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}_{\leq -1, \leq \infty}^{C^0})$  である。

- (1)  $\mathbf{Bsc}_{\leq -1, \leq \infty} := \emptyset$
- (2)  $\mathbf{Sm}_{\leq -1, \leq \infty}(\emptyset) := \{*\}$

と定義する。

#### 仮定 1.1: 帰納法の仮定

与えられた  $k \geq -1$  に対して以下の構成が完了していると仮定する：

- (1) 圏  $\mathbf{Bsc}_{\leq k, \leq \infty}$
- (2) 前層  $\mathbf{Sm}_{\leq k, \leq \infty}: (\mathbf{Snglr}_{\leq k, \leq \infty}^{C^0})^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}$
- (3) 関手

$$\begin{aligned} \mathbb{R} \times (-): \mathbf{Bsc}_{\leq k, \leq \infty} &\rightarrow \mathbf{Bsc}_{\leq k, \leq \infty}, \\ U &\mapsto \mathbb{R} \times U, \\ (U \xrightarrow{f} V) &\mapsto (\mathbb{R} \times U \xrightarrow{\text{id} \times f} \mathbb{R} \times V) \end{aligned}$$

およびそれが誘導する自然変換<sup>a</sup>

$$\begin{array}{ccc} & \mathbf{Sm}_{\leq k, \leq \infty}(-) & \\ \text{curved arrow} \nearrow & \downarrow & \searrow \text{curved arrow} \\ (\mathbf{Snglr}_{\leq k, \leq \infty}^{C^0})^{\text{op}} & & \mathbf{Sets} \\ \text{curved arrow} \searrow & \downarrow & \nearrow \text{curved arrow} \\ & \mathbf{Sm}_{\leq k, \leq \infty}(\mathbb{R} \times -) & \end{array}$$

<sup>a</sup>  $X$  の極大アトラス  $\{U_\alpha, \varphi_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$  に対して,  $\{\mathbb{R} \times U_\alpha, \text{id} \times \varphi_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$  を対応づける。

#### 定義 1.12: 圏 $\mathbf{Bsc}_{\leq k+1, \leq \infty}$

帰納法の仮定 1.1 がある  $k \geq -1$  において成立しているとする。また,  $C^0$  basic を  $U_Z^n := (\mathbb{R}^n \rightarrow [0]) \times C(Z \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  と書く。このとき, 圏  $\mathbf{Bsc}_{\leq k+1, \leq \infty}$  を以下で定義する：

(対象)

$C^0$  basic <sup>a</sup>  $U_Z^n \in \text{Ob}(\text{Snglr}_{\leq k+1, \leq \infty}^{C^0})$  および、極大アトラス  $\mathcal{A}_Z \in \text{Sm}_{\leq k, \leq \infty}(Z \rightarrow P)$  の組み

$$(U_Z^n, \mathcal{A}_Z)$$

を対象とする。これを **basic** と呼ぶ。

(射)

任意の 2 つの対象  $(U_Z^n, \mathcal{A}_Z), (U_W^m, \mathcal{A}_W) \in \text{Ob}(\text{Bsc}_{\leq k+1, \leq \infty})$  に対して、以下の条件を満たす層状化開埋め込み  $f \in \text{Hom}_{\text{Snglr}_{\leq k+1, \leq \infty}^{C^0}}(U_Z^n, U_W^m)$  を射とする：

$f$  がコーンポイントを保存しない場合

ある層状化開埋め込み  $f_0 \in \text{Hom}_{\text{Snglr}_{\leq k+1, \leq \infty}^{C^0}}(U_Z^n, \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}_{>0} \times W)$  が存在して

$$f: U_Z^n \xrightarrow{f_0} \mathbb{R}^m \times (\mathbb{R}_{>0} \times W) \hookrightarrow U_W^m = \mathbb{R}^m \times \mathbb{C}(W)$$

と書いて、かつ  $(U_Z^n, f_0) \in \mathcal{A}_{\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}_{>0} \times W} \in \text{Sm}(\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}_{>0} \times W)$

$f$  がコーンポイントを保存する場合

$f$  は  $\mathbb{R}^n$  に沿って **conically smooth** であって、かつ  $Df: \mathbb{R}^n \times U_Z^n \rightarrow \mathbb{R}^m \times U_W^m$  が単射であり、かつ

$$\mathcal{A}_{f^{-1}(U_W^m \setminus \mathbb{R}^m)} = \text{Sm}_{\leq k, \leq \infty}(f|_{f^{-1}(U_W^m \setminus \mathbb{R}^m)})(\mathcal{A}_{U_W^m \setminus \mathbb{R}^m})$$

を満たす<sup>b</sup>。ただし、 $U_W^m \setminus \mathbb{R}^m := U_W^m \setminus (\mathbb{R}^m \times \{\text{pt}\}) = \mathbb{R}^{m+1} \times W$  と略記した。

<sup>a</sup> **depth** の定義から  $\text{depth}(Z \rightarrow P) \leq \dim(Z \rightarrow P)$  である。故に【例 1.1.8】から、 $\text{depth}(Z \rightarrow P) \leq \dim(Z \rightarrow P) = \text{depth } U_Z^n - 1 \leq k$  であること、i.e.  $(Z \rightarrow P) \in \text{Ob}(\text{Snglr}_{\leq k, \leq \infty}^{C^0})$  が分かる。

<sup>b</sup> ここで帰納法の仮定 1.1-(3) を暗に使っている。

### 定義 1.13: 前層 $\text{Sm}_{\leq k+1, \leq \infty}$

帰納法の仮定 1.1 がある  $k \geq -1$  において成立しているとする。さらに定義 1.12 によって  $\text{Bsc}_{\leq k+1, \leq \infty}$  が完成しているとする。

- $C^0$  級層状化空間  $\forall (X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\text{Snglr}_{\leq k+1, \leq \infty}^{C^0})$  に対して、 $X \rightarrow P$  のアトラス (atlas) を族

$$\mathcal{A} := \left\{ (U_\alpha, \varphi_\alpha) \in \text{Ob}(\text{Bsc}_{\leq k+1, \leq \infty}) \times \text{Hom}_{\text{Snglr}_{\leq k+1, \leq \infty}^{C^0}}(U_\alpha, (X \rightarrow P)) \right\}_{\alpha \in \Lambda}$$

であって以下の条件を満たすものとして定義する：

(Atlas-1)

$\mathcal{A}$  は  $(X \rightarrow P)$  の開被覆である。

(Atlas-2)

$\forall \alpha, \beta \in \Lambda$  および  $\forall x \in \varphi_\alpha(U_\alpha) \cap \varphi_\beta(U_\beta)$  に対して、圏  $\text{Snglr}_{\leq k+1, \leq \infty}^{C^0}$  の可換図式

$$\begin{array}{ccc}
\exists W & \xrightarrow{f_\beta} & U_\beta \\
f_\alpha \downarrow & & \downarrow \varphi_\beta \\
U_\alpha & \xrightarrow{\varphi_\alpha} & X
\end{array}$$

が存在して  $x \in \varphi_\alpha \circ f_\alpha(W) = \varphi_\beta \circ f_\beta(W)$  を充たす. ただし, 可換図式中の赤色の部分は全て圏  $\mathbf{Bsc}_{\leq k+1, \leq \infty}$  の対象および射からなる.

アトラス  $\mathcal{A}$  の元  $(U_\alpha, \varphi_\alpha) \in \mathcal{A}$  のことを**チャート** (chart) と呼ぶ.

- $C^0$  級層状化空間  $\forall (X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}_{\leq k+1, \leq \infty}^{C^0})$  の2つのアトラス  $\mathcal{A}, \mathcal{B}$  が同値であるとは,  $\mathcal{A} \cup \mathcal{B}$  が  $(X \rightarrow P)$  のアトラスであることを言う. これは  $(X \rightarrow P)$  のアトラス全体の集合の上に同値関係を定める<sup>a</sup>.  $(X \rightarrow P)$  の**極大アトラス** (maximal atlas) とは, この同値関係によるアトラス  $\mathcal{A}$  の同値類  $[\mathcal{A}]$  のことを言う.
- 前層

$$\text{Sm}_{\leq k+1, \leq \infty} : (\mathbf{Snglr}_{\leq k+1, \leq \infty}^{C^0})^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

を以下のように定義する:

(対象)

任意の  $C^0$  級層状化空間  $(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}_{\leq k+1, \leq \infty}^{C^0})$  に対して

$$\text{Sm}_{\leq k+1, \leq \infty}(X \rightarrow P) := \{ [\mathcal{A}] \mid \mathcal{A} \text{ is an atlas of } (X \rightarrow P) \}$$

(射)

任意の層状化開埋め込み  $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}_{\leq k+1, \leq \infty}^{C^0}}((X \rightarrow P), (Y \rightarrow Q))$  に対して,  $f$  によるアトラスの引き戻しを対応付ける.

<sup>a</sup> 同値関係であることの証明は [?, Lemma 3.2.11.] を参照.

以上の帰納法をまとめて, conically smooth な層状化空間と層状化開埋め込みの圏  $\mathbf{Snglr}$  を得る.

### 定義 1.14: 圏 $\mathbf{Snglr}$

- **basic** のなす圏  $\mathbf{Bsc}$  を以下で定義する：

$$\mathbf{Bsc} := \bigcup_{k \geq -1} \mathbf{Bsc}_{\leq k, \leq \infty}$$

- 極大アトラスの集合を与える関手  $\mathbf{Sm}: (\mathbf{Snglr}^{C^0})^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Sets}$  を以下の右 Kan 拡張として定義する：

$$\begin{array}{ccc} (\mathbf{Snglr}_{<\infty, \leq \infty}^{C^0})^{\text{op}} & \xrightarrow{\mathbf{Sm}_{<\infty, \leq \infty}} & \mathbf{Sets} \\ \downarrow & \nearrow \text{Sm} & \\ (\mathbf{Snglr}^{C^0})^{\text{op}} & & \end{array}$$

ただし,  $\mathbf{Snglr}_{<\infty, \leq \infty}^{C^0} := \bigcup_{k \geq -1} \mathbf{Snglr}_{\leq k, \leq \infty}^{C^0}$  とおいた.

- **conically smooth** な層状化空間 (conically smooth stratified space) と **層状化開埋め込み** の圏  $\mathbf{Snglr}$  を以下で定義する：

(対象)

**$C^0$  級層状化空間**  $(X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  およびその **極大アトラス**  $\mathcal{A}_X \in \mathbf{Sm}(X \rightarrow P)$  の組み  $((X \rightarrow P), \mathcal{A}_X)$  を対象とする.

(射)

**層状化開埋め込み**  $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}^{C^0}}((X \rightarrow P), (Y \rightarrow Q))$  であって,  $f^* \mathcal{A}_Y = \mathcal{A}_X$  を充たすものを射とする.

### 1.1.5 conically smooth map

ここまでは**層状化開埋め込み**のみを考えていたため, 一般の**層状化写像**の conically smoothness を定義しなくてはならない.

### 定義 1.15: conically smooth map

2つの **basic**<sup>a</sup>  $X = (U_Z^n, \mathcal{A}_Z)$ ,  $Y = (U_W^m, \mathcal{A}_W) \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$  の間の **層状化写像**  $f: U_Z^n \rightarrow U_W^m$  が **conically smooth** であることを, **depth**( $Y$ ) に関する帰納法によって定義する:

- (1) まず,  $\text{depth}(Y) = -1$  のときは  $X = Y = \emptyset$  であり, 一意的に定まる  $X, Y$  間の層状化写像が conically smooth であると定義する.
- (2) 深さ  $k \geq -1$  の basic に対して定義が完了しているとする.  $Y \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$  の深さが高々  $k+1$  であるとき, 層状化写像  $f: X \rightarrow Y$  が conically smooth であることを以下で定義する:

**$f$  がコーンポイントを保存しない場合**

ある conically smooth な層状化写像  $f_0: X \rightarrow \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}_{>0} \times W$  が存在して

$$f: X \xrightarrow{f_0} \mathbb{R}^m \times (\mathbb{R}_{>0} \times W) \hookrightarrow Y = \mathbb{R}^m \times \mathbb{C}(W)$$

と書ける<sup>b</sup>.

**$f$  がコーンポイントを保存する場合**

$f$  は  $\mathbb{R}^n$  に沿って conically smooth であって, かつ制限

$$f|_{f^{-1}(Y \setminus \mathbb{R}^m)}: f^{-1}(Y \setminus \mathbb{R}^m) \rightarrow Y \setminus \mathbb{R}^m$$

が conically smooth. ただし,  $U_W^m \setminus \mathbb{R}^m := U_W^m \setminus (\mathbb{R}^m \times \{\text{pt}\}) = \mathbb{R}^{m+1} \times W$  と略記した.

<sup>a</sup>  $C^0$  basic を  $U_Z^n := (\mathbb{R}^n \rightarrow [0]) \times \mathbb{C}(Z \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  と書く.

<sup>b</sup> 【例 1.1.8】より  $\text{depth}(W) < k+1$  であり, 帰納法の仮定が使える.

**conically smooth な層状化空間**  $((X \rightarrow P), \mathcal{A}_X), ((Y \rightarrow Q), \mathcal{A}_Y) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr})$  の間の **層状化写像**  $f: (X \rightarrow P) \rightarrow (Y \rightarrow Q)$  が **conically smooth** であるとは, 任意のチャートの組み合わせ  $(U, \varphi) \in \mathcal{A}_X, (V, \psi) \in \mathcal{A}_Y$  に対して

$$\psi^{-1} \circ f \circ \varphi: U \rightarrow V$$

が conically smooth (for basics) であることを言う.

### 命題 1.1: conically smooth map の基本性質

2つの **conically smooth map** の合成も conically smooth である.

**証明** [?, Proposition 3.3.5] ■

命題 1.1 より, **conically smooth な層状化空間**の圏を定義できる.



### 定義 1.16: conically smooth な層状化空間の圏 $\mathbf{Strat}$

conically smooth な層状化空間の圏  $\mathbf{Strat}$  を以下で定義する：

(対象)

圏  $\mathbf{Snglr}$  と全く同じ対象を持つ：

$$\mathrm{Ob}(\mathbf{Strat}) := \mathrm{Ob}(\mathbf{Snglr})$$

(射)

conically smooth map を射とする．

定義から明らかに  $\mathbf{Snglr} \subset \mathbf{Strat}$  である．ここで、圏  $\mathbf{Strat}$  における特別な射に名前をつけておこう：

### 定義 1.17: constructible bundle

- conically smooth な層状化写像  $\pi \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{Strat}}((E \rightarrow P), (B \rightarrow Q))$  が層状化ファイバー束 (conically smooth fiber bundle) であるとは、conically smooth な層状化開埋め込みの族  $\{U_\alpha \hookrightarrow B\}_{\alpha \in \Lambda}$ ,  $\{\varphi_\alpha: U_\alpha \times F_\alpha \hookrightarrow E\}_{\alpha \in \Lambda}$  が存在して以下を充たすことを言う：

(Bun-1)

$\forall \alpha \in \Lambda$  に対して、圏  $\mathbf{Strat}$  における引き戻しの図式

$$\begin{array}{ccc} U_\alpha \times F_\alpha & \xhookrightarrow{\varphi_\alpha} & E \\ \mathrm{proj}_1 \downarrow & \lrcorner & \downarrow \pi \\ U_\alpha & \hookrightarrow & B \end{array}$$

が成り立つ．

(Bun-2)

族  $\{U_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$  は  $B$  の開基である．

- conically smooth な層状化写像  $\pi \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{Strat}}((E \rightarrow P), (B \rightarrow Q))$  が弱構成可能束 (weakly constructible bundle) であるとは、 $\forall q \in Q$  に対して、 $\pi$  の  $q$ -層への制限

$$\pi|_{\pi^{-1}(B_q)}: \pi^{-1}(B_q) \longrightarrow B_q$$

が層状化ファイバー束であることを言う．

- conically smooth な層状化写像  $\pi \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{Strat}}((E \rightarrow P), (B \rightarrow Q))$  が構成可能束 (constructible bundle) であることを、 $\mathrm{depth}(E)$  に関する帰納法によって定義する：

(1)  $\mathrm{depth}(E) = 0$  のとき、 $\pi$  が構成可能束であるとは、 $\pi$  が  $C^\infty$  ファイバー束であることを言う．

(2) 深さ  $k \geq 0$  までの定義が完了しているとする． $\mathrm{depth}(E) \leq k+1$  のとき、 $\pi$  が構成可能束であるとは、以下の2条件を充たすことを言う：

(cBun-1)  $\pi$  は弱構成可能束である．

(cBun-2)  $\forall q \in Q$  に対して、 $\pi$  が誘導する層状化写像

$$\mathrm{Link}_{\pi^{-1}(B_q)}(E) \longrightarrow \pi^{-1}(B_q) \times_{B_q} \mathrm{Link}_{B_q}(B)$$

が構成可能束である．

### 1.1.6 管状近傍・ハンドル分解

## 1.2 層状化空間の接構造

### 1.2.1 Kan-豊穡化

圏  $\mathbf{Kan}$  を,

- Kan 複体を対象に持つ
- Kan 複体の間の自然変換を射に持つ

(1, 1)-圏とする.  $\mathbf{Kan}$  は単体的集合の圏  $\mathbf{sSet}$  の充満部分圏であり, 直積 (??) をテンソル積とするモノイダル圏になる.

#### 定義 1.18: 余単体的多様体

以下で定義する関手

$$\Delta_e: \Delta \longrightarrow \mathbf{Strat}$$

のことを余単体的多様体 (standard cosimplicial manifold) と呼ぶ<sup>a</sup>:

- $[n] \in \text{Ob}(\Delta)$  を, **conically smooth な層状化空間**

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

に対応付ける.

- $\alpha \in \text{Hom}_\Delta([m], [n])$  を, **conically smooth な層状化写像**

$$\begin{aligned} \Delta_e(\alpha): \Delta_e^m &\longrightarrow \Delta_e^n, \\ (x^0, \dots, x^m) &\longmapsto \left( \sum_{j, \alpha(j)=0} x^j, \dots, \sum_{j, \alpha(j)=n} x^j \right) \end{aligned}$$

に対応付ける.

<sup>a</sup> 幾何学的  $n$ -単体に似ているが,  $x^i \geq 0$  の領域で切り取っていない.

$\mathbf{PSh}(\mathbf{Strat}, \mathbf{Sets})$  から  $\mathbf{sSet}$  への関手を

$$\begin{aligned} (-)|_\Delta: \mathbf{PSh}(\mathbf{Strat}, \mathbf{Sets}) &\longrightarrow \mathbf{sSet}, \\ F &\longmapsto F \circ \Delta_e \end{aligned}$$

で定義する. さらに,  $\forall X, Y \in \text{Ob}(\mathbf{Strat})$  に対して前層  $\widetilde{\text{Hom}}_{\mathbf{Strat}}(X, Y) \in \mathbf{PSh}(\mathbf{Strat}, \mathbf{Sets})$  を

$$\begin{aligned} \widetilde{\text{Hom}}_{\mathbf{Strat}}(X, Y): \mathbf{Strat}^{\text{op}} &\longrightarrow \mathbf{Sets}, \\ Z &\longmapsto \left\{ f \in \text{Hom}_{\mathbf{Strat}}(Z \times X, Z \times Y) \mid \text{proj}_Z \circ f = \text{proj}_Z \right\}, \end{aligned}$$

$$(Z \xrightarrow{\alpha} W) \mapsto \left( \widetilde{\text{Hom}_{\mathbf{Strat}}(X, Y)}(Z) \longrightarrow \widetilde{\text{Hom}_{\mathbf{Strat}}(X, Y)}(W), \right. \\ \left. f \mapsto \left( (w, x) \mapsto (w, \text{proj}_Y \circ f(\alpha(w), x)) \right) \right)$$

で定義する．ただし，**conically smooth な層状化写像**  $\text{proj}_Z \in \text{Hom}_{\mathbf{Strat}}(Z \times X, Z)$  とは第一成分への射影のことである．同様にして前層  $\widetilde{\text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(X, Y)} \in \text{PSh}(\mathbf{Strat}, \mathbf{Sets})$  を

$$\begin{aligned} \widetilde{\text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(X, Y)}: \mathbf{Strat}^{\text{op}} &\longrightarrow \mathbf{Sets}, \\ Z &\mapsto \{ f \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(Z \times X, Z \times Y) \mid \text{proj}_Z \circ f = \text{proj}_Z \}, \\ (Z \xrightarrow{\alpha} W) &\mapsto \left( \widetilde{\text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(X, Y)}(Z) \longrightarrow \widetilde{\text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(X, Y)}(W), \right. \\ &\quad \left. f \mapsto \left( (w, x) \mapsto (w, \text{proj}_Y \circ f(\alpha(w), x)) \right) \right) \end{aligned}$$

で定義する．

#### 補題 1.2:

$\forall X, Y \in \text{Ob}(\mathbf{Strat})$  に対して定まる単体的集合

$$\begin{aligned} \text{Hom}_{\mathbf{Strat}}(X, Y) &:= \widetilde{\text{Hom}_{\mathbf{Strat}}(X, Y)} \Big|_{\Delta}, \\ \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(X, Y) &:= \widetilde{\text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(X, Y)} \Big|_{\Delta} \end{aligned}$$

は Kan 複体である．

**証明** [?, Lemma 4.1.4.]. ■

#### 定義 1.19: $(\infty, 1)$ -圏 $\mathbf{Strat}$ , $\mathbf{Snglr}$ , $\mathcal{B}\mathbf{sc}$

**Kan-豊稜圏  $\mathbf{Strat}$**  を以下で定義する：

- $\text{Ob}(\mathbf{Strat}) := \text{Ob}(\mathbf{Snglr})$
- 補題 1.2 で構成した  $\text{Hom}_{\mathbf{Strat}}(X, Y) \in \text{Ob}(\mathbf{Kan})$  を Hom 対象とする．

同様に，**Kan-豊稜圏  $\mathbf{Snglr}$**  を以下で定義する：

- $\text{Ob}(\mathbf{Snglr}) := \text{Ob}(\mathbf{Snglr})$
- 補題 1.2 で構成した  $\text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(X, Y) \in \text{Ob}(\mathbf{Kan})$  を Hom 対象とする．

**Kan-豊稜圏  $\mathbf{Snglr}$**  の対象を **Ob( $\mathcal{B}\mathbf{sc}$ )** に制限して得られる充満部分圏を  $\mathcal{B}\mathbf{sc}$  と書く．

!

**Kan-豊稜圏**を homotopy coherent nerve functor  $N_{\text{hc}}: \mathbf{Cat}_{\Delta} \longrightarrow \mathbf{sSet}$  で単体的集合の圏  $\mathbf{sSet}$  へ埋め込んだものは  $(\infty, 1)$ -圏である [?, Proposition 1.1.5.10.]. 故に以下では **Kan-豊稜圏  $\mathbf{Strat}$ ,  $\mathbf{Snglr}$**  と  $(\infty, 1)$ -圏  $N_{\text{hc}}(\mathbf{Strat})$ ,  $N_{\text{hc}}(\mathbf{Snglr})$  を区別しない．

### 1.2.2 $(\infty, 1)$ -圏におけるファイブレーション

#### 定義 1.20: $(\infty, 1)$ -ファイブレーション

$p: \mathcal{E} \longrightarrow \mathcal{B}$  を  $(\infty, 1)$ -圏の関手とする.

##### (lifting property)

包含  $\iota \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Lambda_j^n, \Delta^n)$  に関して  $p \circ f_0 = f \circ \iota$  を満たす任意の  $(f_0, f) \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Lambda_j^n, \mathcal{E}) \times \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^n, \mathcal{B})$  に対して, 以下の図式を可換にする  $\bar{f} \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^n, \mathcal{E})$  が存在する:

$$\begin{array}{ccc} \Lambda_j^n & \xrightarrow{\forall f_0} & \mathcal{E} \\ \downarrow \iota & \nearrow \exists \bar{f} & \downarrow p \\ \Delta^n & \xrightarrow{\forall f} & \mathcal{B} \end{array}$$

- $p$  が **内的ファイブレーション** (inner fibration) であるとは,  $0 < \forall j < \forall n$  に対して **(lifting property)** を満たすことを言う.
- $p$  が **右ファイブレーション** (right fibration) であるとは,  $0 < \forall j \leq \forall n$  に対して **(lifting property)** を満たすことを言う.
- $p$  が **左ファイブレーション** (left fibration) であるとは,  $0 \leq \forall j < \forall n$  に対して **(lifting property)** を満たすことを言う.
- $p$  が **Kan ファイブレーション** (Kan fibration) であるとは,  $0 \leq \forall j \leq \forall n$  に対して **(lifting property)** を満たすことを言う.

系??によると, **(lifting property)** は,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{B}$  における角の図式  $(p_{[n-1]}(f_{00}), \dots, \underbrace{\bullet}_j, \dots, p_{[n-1]}(f_{0n})) \in (\mathcal{B}_{n-1})^{\times n}$  を  $n$ -射  $f \in \mathcal{B}_n$  が埋めているならば,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{E}$  における角の図式  $(f_{00}, \dots, \underbrace{\bullet}_j, \dots, f_{0n}) \in (\mathcal{E}_{n-1})^{\times n}$  を埋める  $n$ -射  $\bar{f} \in \mathcal{E}_n$  が存在することを主張している.

#### 定義 1.21: アイソファイブレーション

$p: \mathcal{E} \longrightarrow \mathcal{B}$  を **内的ファイブレーション** とする.  $p$  が **アイソファイブレーション** (isofibration) であるとは,  $\mathcal{E}$  における任意の対象  $x \in \mathcal{E}_0$  および  $\mathcal{B}$  における任意の同型射  $(y \xrightarrow{f} p_{[0]}(x)) \in \mathcal{B}_1$  に対して,  $\mathcal{E}$  の同型射  $(\bar{y} \xrightarrow{\bar{f}} x) \in \mathcal{E}_1$  が存在して  $p_{[1]}(\bar{f}) = f$  を満たすこと<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>  $\mathcal{B}$  の同型射が  $\mathcal{E}$  の同型射に持ち上がるということ.

一般に, 定義??, 1.20, 1.21 の間には次の関係がある [?, Tag 01GP]:

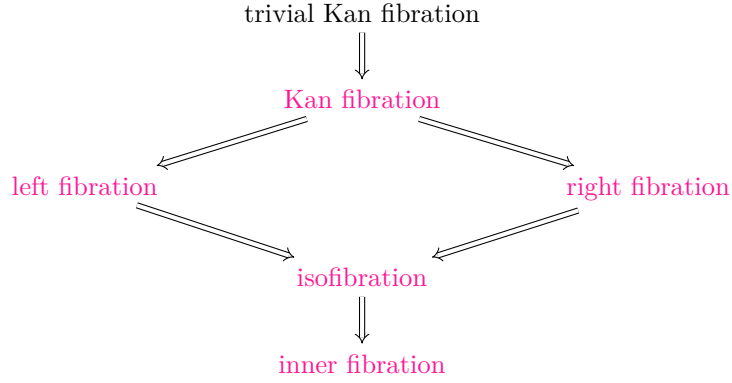


図 1.1:  $(\infty, 1)$ -圏における種々のファイブレーションの関係.  $A \implies B$  は  $A$  ならば  $B$  を意味する.

### 定義 1.22: 充満部分 $(\infty, 1)$ -圏

- $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}$  の部分  $(\infty, 1)$ -圏 (sub  $(\infty, 1)$ -category) とは, 単体的部分集合  $\mathcal{S} \subset \mathcal{C}$  であって, その包含写像  $i: \mathcal{S} \hookrightarrow \mathcal{C}$  が内的ファイブレーションであるようなもののこと<sup>a</sup>.
- 部分  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{S} \subset \mathcal{C}$  が充満部分  $(\infty, 1)$ -圏 (full sub  $(\infty, 1)$ -category) であるとは,  $\forall n \geq 0$  に対して以下の条件を充たすことを言う:

(fullsub)  $\forall \sigma \in \mathcal{C}_n \cong \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^n, \mathcal{C})$  に対して,

$$\sigma_{[0]}(\Delta_0^n) \subset S_0 \implies \sigma \in \mathcal{S}_n$$

が成り立つ<sup>b</sup>.

<sup>a</sup> このとき  $\mathcal{S}$  は  $(\infty, 1)$ -圏になる [?, Tag 01CG]

<sup>b</sup> すなわち,  $\mathcal{C}$  の勝手な  $n$ -射  $\sigma \in \mathcal{C}_n$  を図??の方法で図示した際に, そこに出現する全ての頂点が  $S_0$  の元であるならば  $\sigma \in \mathcal{S}_n$  である.

2つの右ファイブレーション  $\mathcal{E} \xrightarrow{p} \mathcal{B}$ ,  $\mathcal{E}' \xrightarrow{p'} \mathcal{B}$  が与えられたとき, これらの間の射とは集合

$$\text{Hom}_{\mathbf{Rf}b_{\mathcal{B}}}(\mathcal{E}, \mathcal{E}') := \{ f \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\mathcal{E}, \mathcal{E}') \mid p' \circ f = p \}$$

のことである.  $\text{Hom}_{\mathbf{Rf}b_{\mathcal{B}}}(\mathcal{E}, \mathcal{E}')$  の元を  $\mathbf{sSet}$  における可換図式として表すと以下の通り:

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{E} & \xrightarrow{f} & \mathcal{E}' \\ & \searrow p & \swarrow p' \\ & \mathcal{B} & \end{array}$$

$\text{Hom}_{\mathbf{Rf}b_{\mathcal{B}}}(\mathcal{E}, \mathcal{E}') \subset \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\mathcal{E}, \mathcal{E}')$  を【例??】の方法で単体的集合と見做せる. このようにして得られる単体的集合  $\text{Hom}_{\mathbf{Rf}b_{\mathcal{B}}}(\mathcal{E}, \mathcal{E}')$  の最大の部分 Kan 複体を  $\mathbf{Hom}_{\mathbf{Rf}b_{\mathcal{B}}}(\mathcal{E}, \mathcal{E}')$  と書く.

**定義 1.23: 右ファイブレーションの成す  $(\infty, 1)$ -圏**

$\mathcal{B}$  を  $(\infty, 1)$ -圏とする. **Kan-豊穠圏**  $\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}}$  を

- 右ファイブレーションを対象とする
- $\mathrm{Hom}_{\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}}}(\mathcal{E}, \mathcal{E}')$  を  $\mathrm{Hom}$  対象とする

ことで定義する. 以降では  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathrm{N}_{\mathrm{hc}}(\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}}) \in \mathrm{Ob}(\mathbf{sSet})$  のことも  $\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}}$  と書き, 区別しない.

**1.2.3  $(\infty, 1)$ -圏におけるスライス圏**

**定義 1.24: 単体的集合の join**

2 つの単体的集合  $S, T \in \mathrm{Ob}(\mathbf{sSet})$  の **join** とは, 単体的集合

$$\begin{aligned} S \star T &: \Delta^{\mathrm{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}, \\ [n] &\longmapsto \coprod_{[i]; -1 \leq i \leq n} (S_i \times T_{n-i-1}), \\ \left( [m] \xrightarrow{\alpha} [n] \right) &\longmapsto \left( ([i]; (x, y)) \mapsto \left( \alpha^{-1}([i]); (S(\alpha|_{\alpha^{-1}([i])})(x), T(\alpha|_{\alpha^{-1}([m] \setminus [i])})(y)) \right) \right) \end{aligned}$$

のこと. ただし  $S_{-1} = T_{-1} := \{*\}$ ,  $[-1] := \emptyset$  とおいた.

$d_j^n \in \mathrm{Hom}_{\Delta^{\mathrm{op}}}([n], [n-1])$  に対して

$$\begin{aligned} (d_j^n)^{-1}([i]) &= \begin{cases} [i], & -1 \leq i < j \\ [i-1], & j \leq i \leq n \end{cases} \\ (d_j^n)^{-1}([n] \setminus [i]) &= \begin{cases} [n-1] \setminus [i], & -1 \leq i < j \\ [n-1] \setminus [i-1], & j \leq i \leq n \end{cases} \end{aligned}$$

であるから,  $S \star T$  の面写像は  $n \geq 1, 0 \leq j \leq n$  に対して

$$\begin{aligned} \partial_j^n: \coprod_{-1 \leq i \leq n} (S_i \times T_{n-i-1}) &\longrightarrow \coprod_{-1 \leq i \leq n-1} (S_i \times T_{n-i-2}), \\ ([i]; (x, y)) &\longmapsto \begin{cases} ([-1]; (*, \partial_j^n y)), & i = -1 \\ ([i]; (x, \partial_{j-i-1}^{n-i-1} y)), & 0 \leq i < j, (i, j) \neq (n-1, n) \\ ([i-1]; (\partial_j^i x, y)), & j \leq i \leq n-1, (i, j) \neq (0, 0) \\ ([n-1]; (\partial_j^n x, *)), & i = n \\ ([n-1]; (x, *)), & (i, j) = (n-1, n) \\ ([-1]; (*, y)), & (i, j) = (0, 0) \end{cases} \end{aligned} \tag{1.2.1}$$

となる.

【例 1.2.1】 join  $\Delta^0 \star \Delta^0$

$\Delta^0 \star \Delta^0$  を計算してみよう<sup>a</sup>。まず対象は

$$(\Delta^0 \star \Delta^0)_0 = \Delta^0_0 \sqcup \Delta^0_0 = \left\{ \begin{array}{c} \{0\} \\ \bullet \\ \bullet \\ \{0\} \end{array} \right\}$$

である。1-射は

$$(\Delta^0 \star \Delta^0)_1 = \Delta^0_1 \sqcup (\Delta^0_0 \times \Delta^0_0) \sqcup \Delta^0_1$$

であるが、(1.2.1) より始点関数は

$$\begin{aligned} \partial_1^1|_{\Delta^0_0 \times \Delta^0_0} : \Delta^0_0 \times \Delta^0_0 &\longrightarrow \Delta^0_0 \sqcup \Delta^0_0, \\ (\{0\}, \{0\}) &\longmapsto \{0\} \end{aligned}$$

終点関数は

$$\begin{aligned} \partial_0^1|_{\Delta^0_0 \times \Delta^0_0} : \Delta^0_0 \times \Delta^0_0 &\longrightarrow \Delta^0_0 \sqcup \Delta^0_0, \\ (\{0\}, \{0\}) &\longmapsto \{0\} \end{aligned}$$

となるため、 $\Delta^0_1$ ,  $\Delta^0_1$  が縮退していることを考慮すると

$$(\Delta^0 \star \Delta^0)_1 = \left\{ \begin{array}{c} \{0\} \\ \bullet \\ \downarrow \\ \bullet \\ \{0\} \end{array} \right\}$$

と図示できる。

---

<sup>a</sup> 左右の区別を付けるために色を付けた。

【例 1.2.2】 join  $\Delta^1 \star \Delta^0$

$\Delta^1 \star \Delta^0$  を計算してみよう。まず対象は

$$(\Delta^1 \star \Delta^0)_0 = \Delta^1_0 \sqcup \Delta^0_0 = \left\{ \begin{array}{cc} \{0\} & \{1\} \\ \bullet & \bullet \\ & \bullet \\ & \{0\} \end{array} \right\}$$

である。1-射は

$$(\Delta^1 \star \Delta^0)_1 = \Delta^1_1 \sqcup (\Delta^1_0 \times \Delta^0_0) \sqcup \Delta^0_1$$

であるが, (1.2.1) より始点関数は

$$\begin{aligned} \partial_1^1|_{\Delta_0^1 \times \Delta_0^0} : \Delta_0^1 \times \Delta_0^0 &\longrightarrow \Delta_0^1 \sqcup \Delta_0^0, \\ (x, \{0\}) &\longmapsto x \end{aligned}$$

終点関数は

$$\begin{aligned} \partial_0^1|_{\Delta_0^1 \times \Delta_0^0} : \Delta_0^1 \times \Delta_0^0 &\longrightarrow \Delta_0^1 \sqcup \Delta_0^0, \\ (x, \{0\}) &\longmapsto \{0\} \end{aligned}$$

となるため,

$$\Delta^1 \star \Delta^0 = \left\{ \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \{0\} & \{1\} \\ \bullet & \bullet \end{array} \\ \xrightarrow{\text{red}} \\ \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \end{array} \\ \xrightarrow{\text{green}} \\ \begin{array}{c} \bullet \\ \{0\} \end{array} \end{array} \right\}$$

(Id<sub>[1]</sub>, {0})

と図示できる. ただし, 三角形の内部は 2-射  $(\text{Id}_{[1]}, \{0\}) \in \Delta_1^1 \times \Delta_0^0 \subset (\Delta^1 \star \Delta^0)_2$  が埋めている. 同様に

$$(\Delta^0 \star \Delta^1)_1 = \left\{ \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \{0\} & \{1\} \\ \bullet & \bullet \end{array} \\ \xrightarrow{\text{blue}} \\ \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \end{array} \\ \xrightarrow{\text{green}} \\ \begin{array}{c} \bullet \\ \{0\} \end{array} \end{array} \right\}$$

({0}, Id<sub>[1]</sub>)

であることが分かる.

### 【例 1.2.3】 join $\Delta^2 \star \Delta^0$

$\Delta^2 \star \Delta^0$  を計算してみよう. まず

$$(\Delta^2 \star \Delta^0)_0 = \Delta_0^2 \sqcup \Delta_0^0 = \left\{ \begin{array}{ccc} \{1\} & & \{0\} \\ & \bullet & \\ & & \bullet \\ & & \bullet \\ & \bullet & \\ & & \bullet \\ & & \bullet \end{array} \right\}$$

{2}

{0}



である．次に 1 射は

$$(\Delta^2 \star \Delta^0)_1 = \Delta^2_1 \sqcup (\Delta^2_0 \times \Delta^0_0) \sqcup \Delta^0_1$$

であるが，(1.2.1) より始点関数は

$$\begin{aligned} \partial_1^1|_{\Delta^2_0 \times \Delta^0_0} : \Delta^2_0 \times \Delta^0_0 &\longrightarrow \Delta^2_0 \sqcup \Delta^0_0, \\ (x, \text{Id}_{\{0\}}) &\longmapsto x \end{aligned}$$

となり，終点関数は

$$\begin{aligned} \partial_0^1|_{\Delta^2_0 \times \Delta^0_0} : \Delta^2_0 \times \Delta^0_0 &\longrightarrow \Delta^2_0 \sqcup \Delta^0_0, \\ (x, \text{Id}_{\{0\}}) &\longmapsto \{0\} \end{aligned}$$

となる．従って図式??に倣うと

$$(\Delta^2 \star \Delta^0)_1 = \Delta^2_1 \sqcup (\Delta^2_0 \times \Delta^0_0) \sqcup \Delta^0_1 = \left\{ \begin{array}{ccc} \{0\} & & \{2\} \\ & \nearrow & \searrow \\ & \{1\} & \\ & \downarrow & \\ \{0\} & & \end{array} \right\}$$

と図示できる．ただし，四面体の内部は 3-射  $(\text{Id}_{[2]}, \{0\}) \in \Delta^2_2 \times \Delta^0_0 \subset (\Delta^1 \star \Delta^0)_3$  が埋めている．同様に， $\Delta^0 \star \Delta^2$  の 1-射を図示すると

$$(\Delta^0 \star \Delta^2)_1 = \Delta^0_1 \sqcup (\Delta^0_0 \times \Delta^2_0) \sqcup \Delta^2_1 = \left\{ \begin{array}{ccc} & \{0\} & \\ & \downarrow & \\ \{0\} & \{1\} & \{2\} \\ & \uparrow & \\ & \{0\} & \end{array} \right\}$$

のようになる．

#### 【例 1.2.4】 join $\Delta^n \star \Delta^0$

【例 1.2.1】，【例 1.2.2】，【例 1.2.3】で見てきた通り， $\Delta^n \star \Delta^0$  とは， $\Delta^n$  に 1 つ頂点を付け足してそれをもともとあった  $\Delta^n$  の全ての頂点と繋ぎ，内部を  $n+1$ -単体で埋めることによって構成される．故に，自然同型  $\Delta^n \star \Delta^0 \cong \Delta^{n+1}$  がある．特に  $\Delta^0$  の頂点は  $\Delta^{n+1}$  の頂点  $\{n+1\} \in \Delta_0^{n+1}$  に埋め込まれている．

**補題 1.3:**  $(\infty, 1)$ -圏同士の join は  $(\infty, 1)$ -圏

$(\infty, 1)$ -圏同士の join は  $(\infty, 1)$ -圏である。

証明 [?, Proposition 1.2.8.3] ■

**定義 1.25:** スライス  $(\infty, 1)$ -圏

$(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{D}, \mathcal{C}$  および  $(\infty, 1)$ -圏の関手  $p \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\mathcal{D}, \mathcal{C})$  を与える。  $p$  に沿った  $\mathcal{C}$  のスライス圏 (overcategory)

$$\mathcal{C}_{/p}: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

を以下で定義する：

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

$$\text{Hom}_p(\Delta^n \star \mathcal{D}, \mathcal{C}) := \{ f \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^n \star \mathcal{D}, \mathcal{C}) \mid f|_{\mathcal{D}} = p \}$$

を対応付ける<sup>a</sup>。

- $\forall \alpha \in \text{Hom}_{\Delta^{\text{op}}}([m], [n])$  に対して、 写像

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_{/p}(\alpha): \text{Hom}_p(\Delta^m \star \mathcal{D}, \mathcal{C}) &\longrightarrow \text{Hom}_p(\Delta^n \star \mathcal{D}, \mathcal{C}), \\ f &\longmapsto f \circ (\alpha_* \star \text{Id}_{\mathcal{D}}) \end{aligned}$$

を対応付ける。

実際、単体的集合  $\mathcal{C}_{/p}$  は  $(\infty, 1)$ -圏である [?, Tag 018F].

<sup>a</sup>  $f|_{\mathcal{D}}$  というのは、join の定義における  $(\Delta^n \star \mathcal{D})_k$  の disjoint union のうち、添字  $i = 0$  が振られている成分への制限を意味する。

$p$  に沿った  $\mathcal{C}$  のコスライス圏 (undercategory)

$$\mathcal{C}_{p/}: \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

を以下で定義する：

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

$$\text{Hom}_p(\mathcal{D} \star \Delta^n, \mathcal{C}) := \{ f \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\mathcal{D} \star \Delta^n, \mathcal{C}) \mid f|_{\mathcal{D}} = p \}$$

を対応付ける<sup>a</sup>。

- $\forall \alpha \in \text{Hom}_{\Delta^{\text{op}}}([m], [n])$  に対して、 写像

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_{p/}(\alpha): \text{Hom}_p(\mathcal{D} \star \Delta^m, \mathcal{C}) &\longrightarrow \text{Hom}_p(\mathcal{D} \star \Delta^n, \mathcal{C}), \\ f &\longmapsto f \circ (\text{Id}_{\mathcal{D}} \star \alpha_*) \end{aligned}$$

を対応付ける。

<sup>a</sup>  $f|_{\mathcal{D}}$  というのは, **join の定義**における  $(\mathcal{D} \star \Delta^n)_k$  の disjoint union のうち, 添字  $i = n$  が振られている成分への制限を意味する.

特に注目すべきは,  $(\infty, 1)$ -圏の関手  $p: \Delta^0 \rightarrow \mathcal{C}$  をとった場合である. このとき  $X := p_{[0]}(\{0\}) \in \mathcal{C}_0$  において  $\mathcal{C}_{/X}$ ,  $\mathcal{C}_{X/}$  などを書く.

まず,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}_{/X}$  の対象  $\varphi \in (\mathcal{C}_{/X})_0 = \text{Hom}_p(\Delta^0 \star \Delta^0, \mathcal{C})$  をとる. すると【例 1.2.1】および  $\varphi|_{\Delta^0} = p$  の条件から,  $\varphi_{[1]}: (\Delta^0 \star \Delta^0)_1 \rightarrow \mathcal{C}_1$  とは図式

$$\varphi = \begin{array}{c} \varphi_{[0]}|_{\Delta_0^0}(\{0\}) \\ \bullet \\ \downarrow \varphi_{[1]}|_{\Delta_0^0 \times \Delta_0^0}(\{0\} \rightarrow \{0\}) \\ \bullet \\ X \end{array}$$

である.  $n \geq 2$  射に相当する  $\varphi_{[n]}: (\Delta^0 \star \Delta^0)_n \rightarrow \mathcal{C}_n$  のデータは縮退していて自明である. 従って,  $\varphi$  は  $(1, 1)$ -圏における  $X$  上のスライス圏の対象と等価なデータを与える.

同様に,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}_{/X}$  の 1-射  $f \in (\mathcal{C}_{/X})_1 = \text{Hom}_p(\Delta^1 \star \Delta^0, \mathcal{C})$  とは, 【例 1.2.2】より

$$f = \begin{array}{c} f_{[0]}|_{\Delta_0^1}(\{0\}) \bullet \xrightarrow{\quad} \bullet f_{[0]}|_{\Delta_0^1}(\{1\}) \\ \quad \searrow \quad \swarrow \\ \quad \quad \triangle \\ \quad \quad \quad f_{[2]}|_{\Delta_1^1 \times \Delta_0^0}(\text{Id}_{[2]}, \{0\}) \\ \quad \quad \quad \swarrow \quad \searrow \\ \quad \bullet \\ X \end{array} \quad (1.2.2)$$

のことである. ただし三角形の内部は 2-射  $f_{[2]}|_{\Delta_1^1 \times \Delta_0^0}(\text{Id}_{[2]}, \{0\}) \in \mathcal{C}_2$  が埋めている. これは  $(1, 1)$ -圏における  $X$  上のスライス圏の射のデータに対応しているが, 横向きの矢印を決めるだけでは  $f$  が upto homotopy でしか定まらないという点で異なっている.

$(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}_{/X}$  の  $n$ -射も同様に図示できる.

#### 【例 1.2.5】スライス圏からの forgetful functor

$(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}$  の,  $X: \Delta^0 \rightarrow \mathcal{C}$  に沿った**スライス圏**に対して, **忘却関手** (forgetful functor)

$$\text{forget}: \mathcal{C}_{/X} \rightarrow \mathcal{C}$$

を次のように定義する:

$$\begin{aligned} \text{forget}_{[n]}: (\mathcal{C}_{/X})_n = \text{Hom}_X(\Delta^n \star \Delta^0, \mathcal{C}) &\rightarrow \mathcal{C}_n = \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^n, \mathcal{C}), \\ f &\mapsto f|_{\Delta^n} \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

$n = 0, 1, 2$  の場合, i.e. 【例 1.2.1】, 【例 1.2.2】, 【例 1.2.3】の図式においては, ちょうど  $X \in \mathcal{C}_0$  に対応する青色の頂点 (コーンポイント) を除去する操作に対応している. (1.2.3) の定義は**右ファイブレーション**である [?, Tag 018F].

### 1.2.4 $(\infty, 1)$ -圏の limit/colimit

後の議論のため、先取りして  $(\infty, 1)$ -圏における limit/colimit を定義しておこう。  $(\infty, 1)$ -圏のモデルとして quasi-category を採用する場合、これは **homotopy limit/colimit** と呼ばれることもある。

#### 定義 1.26: 左/右錐

$(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}$  を与える。

- **join** によって得られる  $(\infty, 1)$ -圏  $\Delta^0 \star \mathcal{C}$  のことを  $\mathcal{C}$  の**左錐** (left cone) と呼び、  $\mathcal{C}^\triangleleft$  と書く。
- **join** によって得られる  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C} \star \Delta^0$  のことを  $\mathcal{C}$  の**右錐** (right cone) と呼び、  $\mathcal{C}^\triangleright$  と書く。

#### 定義 1.27: $(\infty, 1)$ -圏における始対象と終対象

- $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}$  における対象  $x_0 \in \mathcal{C}_0$  が**始対象** (initial object) であるとは、  $\forall x \in \mathcal{C}_0$  に対して射の空間  $\text{Map}_{\mathcal{C}}(x_0, x) \in \text{Ob}(\mathbf{Kan})$  が  $\Delta^0$  とホモトピー同値であること。
- $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}$  における対象  $x_0 \in \mathcal{C}_0$  が**終対象** (final object) であるとは、  $\forall x \in \mathcal{C}_0$  に対して射の空間  $\text{Map}_{\mathcal{C}}(x, x_0) \in \text{Ob}(\mathbf{Kan})$  が  $\Delta^0$  とホモトピー同値であること。

#### 定義 1.28: $(\infty, 1)$ -圏の limit/colimit

$(\infty, 1)$ -圏の関手  $D: \mathcal{I} \rightarrow \mathcal{C}$  を与える<sup>a</sup>。

- $D$  の **limit** とは、 **スライス  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}_{/D}$**  における**終対象**のこと。  $\lim D \in (\mathcal{C}_{/D})_0 = \text{Hom}_D(\mathcal{I}^\triangleleft, \mathcal{C})$  と書く。
- $D$  の **colimit** とは、 **コスライス  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}_{D/}$**  における**始対象**のこと。  $\text{colim } D \in (\mathcal{C}_{D/})_0 = \text{Hom}_D(\mathcal{I}^\triangleright, \mathcal{C})$  と書く。

<sup>a</sup>  $(1, 1)$ -圏の場合からのアナロジーで、  $D$  を図式と見做す。

以降で登場する  **$(\infty, 1)$ -圏の limit** は、  $(\infty, 1)$ -圏の成す  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}$  に値をとる図式  $D: \mathcal{I} \rightarrow \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}$  に関するものがほとんどである。

#### 【例 1.2.6】 pullback

$(\infty, 1)$ -圏の関手  $D: (\Delta^1 \times \Delta^1) \setminus \{(0, 0)\} \rightarrow \mathcal{C}$  の **limit** のことを (存在すれば) **pullback** と呼び、

$$D(0, 1) \times_{D(1, 1)} D(1, 0) := \lim D$$

と書く。

【例 1.2.6】 は、 今後種々の  $(\infty, 1)$ -圏の定義に用いるため、 具体的な公式を紹介しておこう。  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}$

に対して, 射の  $(\infty, 1)$ -圏 (arrow category)  $\mathcal{F}\mathbf{un}(\Delta^1, \mathcal{C})$  のうち同型射全体が成す **充満部分**  $(\infty, 1)$ -圏を

$$\mathcal{I}\mathbf{som}(\mathcal{C}) \hookrightarrow \mathcal{F}\mathbf{un}(\Delta^1, \mathcal{C})$$

と書く.

#### 補題 1.4: $(\infty, 1)$ -圏の引き戻しの公式

- $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}, \mathcal{C}_0, \mathcal{C}_1$
- $(\infty, 1)$ -圏の開手  $F_0: \mathcal{C}_0 \rightarrow \mathcal{C}, F_1: \mathcal{C}_1 \rightarrow \mathcal{C}$

を与える. さらに,  $(\infty, 1)$ -圏<sup>a</sup>  $\mathcal{C}_0 \times_{\mathcal{C}}^h \mathcal{C}_1$  を,  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  における引き戻し

$$\mathcal{C}_0 \times_{\mathcal{C}}^h \mathcal{C}_1 := \mathcal{C}_0 \times_{\mathcal{F}\mathbf{un}(\{0\}, \mathcal{C})} \mathcal{I}\mathbf{som}(\mathcal{C}) \times_{\mathcal{F}\mathbf{un}(\{1\}, \mathcal{C})} \mathcal{C}_1 \quad (1.2.4)$$

として定義する [?, Tag 032Z]. このとき,  $\mathcal{C}_0 \times_{\mathcal{C}}^h \mathcal{C}_1$  は  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}$  における図式  $\mathcal{C}_0 \xrightarrow{F_0} \mathcal{C} \xleftarrow{F_1} \mathcal{C}_1$  の **limit** を与える. i.e.  $\mathbf{sSet}$  における図式<sup>b</sup>

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{C}_0 \times_{\mathcal{C}}^h \mathcal{C}_1 & \xrightarrow{\text{proj}_{\mathcal{C}_1}} & \mathcal{C}_1 \\ \text{proj}_{\mathcal{C}_0} \downarrow & & \downarrow F_1 \\ \mathcal{C}_0 & \xrightarrow{F_0} & \mathcal{C} \end{array}$$

は  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻しを与える.

<sup>a</sup> [?, Tag 0330] よりこれは  $(\infty, 1)$ -圏である.

<sup>b</sup> up to isomorphism で可換なのであって, 可換とは限らない!

#### 証明

(1.2.4) をより具体的に書くと, これは  $\mathbf{sSet}$  における 2 重の引き戻し

$$\begin{array}{ccccc} \mathcal{C}_0 \times_{\mathcal{C}}^h \mathcal{C}_1 & \xrightarrow{\quad \quad \quad} & \mathcal{C}_1 & & \\ \downarrow & \searrow & \downarrow F_1 & & \\ & \mathcal{I}\mathbf{som}(\mathcal{C}) & \xrightarrow{(\text{Id}_{\Delta} \bullet \times d_0^1)^*} & \mathcal{F}\mathbf{un}(\{1\}, \mathcal{C}) \cong \mathcal{C} & \\ & \downarrow (\text{Id}_{\Delta} \bullet \times d_1^1)^* & & & \\ \mathcal{C}_0 & \xrightarrow{F_0} & \mathcal{F}\mathbf{un}(\{0\}, \mathcal{C}) \cong \mathcal{C} & & \end{array}$$

のことである. 命題??-(2) の証明より,  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  における引き戻しとは  $n$ -単体毎に  $\mathbf{Sets}$  における引き戻しを取ることで構成されるから, この引き戻しは具体的に計算できる.

**補題 1.5:  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻しとアイソファイブレーション**

- $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}, \mathcal{C}_0, \mathcal{C}_1$
- $(\infty, 1)$ -圏の関手  $F_0: \mathcal{C}_0 \rightarrow \mathcal{C}, F_1: \mathcal{C}_1 \rightarrow \mathcal{C}$

を与える. このとき  $F_0, F_1$  の少なくともどちらか一方がアイソファイブレーションならば,  $(\infty, 1)$ -圏同値

$$\mathcal{C}_0 \times_{\mathcal{C}} \mathcal{C}_1 \xrightarrow{\sim} \mathcal{C}_0 \times_{\mathcal{C}}^h \mathcal{C}_1$$

がある. ただし,  $\mathcal{C}_0 \times_{\mathcal{C}} \mathcal{C}_1$  は  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  における引き戻しである.

**証明** [?, Tag 033T] ■

補題 1.4 と補題 1.5 を併せると,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}$  の図式  $\mathcal{C}_0 \xrightarrow{F_0} \mathcal{C} \xleftarrow{F_1} \mathcal{C}_1$  において  $F_0, F_1$  のどちらか一方がアイソファイブレーションならば, その図式の  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻しは単に  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  における引き戻しとして (up to equivalence で) 計算できることが分かる! この事実は実用上極めて便利である. 実際, 後に  $F_0, F_1$  のどちらか一方が右ファイブレーションである場合が頻発するが, その際の計算では常に補題 1.5 を用いる.

### 1.2.5 Unstraightening construction

**定理 1.1: unstraightening construction**

$(\infty, 1)$ -圏同値

$$\mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathcal{B}) \xrightarrow{\sim} \mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}}$$

が存在する.

**証明**  $(\infty, 1)$ -圏同値

$$\mathbf{Un}: \mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathcal{B}) \rightarrow \mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}}$$

は, 次のようにして構成される (unstraightening construction):

対象  $F \in \mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathcal{B})_0$  に対して,  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻し

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{Un}(F) & \longrightarrow & \mathcal{S}\mathbf{paces}_{/*} \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow \text{forget} \\ \mathcal{B} & \xrightarrow{F} & \mathcal{S}\mathbf{paces} \end{array}$$

により得られる右ファイブレーション  $\mathbf{Un}(F) \rightarrow \mathcal{B} \in (\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}})_0$  を対応付ける.

$n$ -射

逆向きの  $(\infty, 1)$ -圏同値 (straightning construction)

$$\mathbf{St}: \mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}} \rightarrow \mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathcal{B})$$

は難しい. 詳細は [?, Proposition 2.2.3.11] を参照. ■

### 1.2.6 $(\infty, 1)$ -圏における米田埋め込み

#### 定義 1.29: twisted arrow category

$(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}$  を与える. このとき,  $\mathcal{C}$  の **twisted arrow category** と呼ばれる  $(\infty, 1)$ -圏を以下で定義する:

$$\begin{aligned} \mathrm{Tw}(\mathcal{C}) &: \Delta^{\mathrm{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}, \\ [n] &\longmapsto \mathrm{Hom}_{\mathbf{sSet}}((\Delta^n)^{\mathrm{op}} \star \Delta^n, \mathcal{C}), \\ ([m] \xrightarrow{\alpha} [n]) &\longmapsto (f \mapsto f \circ (\alpha_* \times \alpha_*)) \end{aligned}$$

$(\infty, 1)$ -圏の関手

$$\mathrm{pr}: \mathrm{Tw}(\mathcal{C}) \longrightarrow \mathcal{C}^{\mathrm{op}} \times \mathcal{C}$$

を以下で定義すると, これは**左ファイブレーション**になる [?, Tag 03JQ]:

$$\begin{aligned} \mathrm{pr}_{[n]}: \mathrm{Tw}(\mathcal{C})_n &\longrightarrow \mathcal{C}_n^{\mathrm{op}} \times \mathcal{C}_n = \mathrm{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^n, \mathcal{C}^{\mathrm{op}}) \times \mathrm{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^n, \mathcal{C}) \\ f &\longmapsto (f|_{(\Delta^n)^{\mathrm{op}}}, f|_{\Delta^n}) \end{aligned}$$

$(\infty, 1)$ -圏における Hom 関手

$$\mathrm{Map}_{\mathcal{C}}: \mathcal{C}^{\mathrm{op}} \times \mathcal{C} \longrightarrow \mathbf{Spaces}$$

の自然な構成は, **straightning construction** を用いた

$$\begin{array}{ccc} \mathrm{Tw}(\mathcal{C}) & \longrightarrow & \mathbf{Spaces}_{*/} \\ \mathrm{pr} \downarrow & \lrcorner & \downarrow \mathrm{forget} \\ \mathcal{C}^{\mathrm{op}} \times \mathcal{C} & \xrightarrow[\mathrm{Map}_{\mathcal{C}} := \mathrm{St}(\mathrm{pr})]{} & \mathbf{Spaces} \end{array}$$

である [?, I.26., p.19].

### 定義 1.30: $(\infty, 1)$ -圏の米田埋め込み (informal)

$\mathcal{C}$  を  $(\infty, 1)$ -圏とする.  $(\infty, 1)$ -圏の米田埋め込み (Yoneda embedding)

$$y: \mathcal{C} \longrightarrow \mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathcal{C})$$

とは,  $\mathcal{C}$  から  $(\infty, 1)$ -前層の成す  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathcal{C})$  への  $(\infty, 1)$ -圏の関手であって, 対象  $x \in \mathcal{C}_0$  に対して

$$\begin{aligned} y_{[0]}(x)_{[0]}: \mathcal{C}_0^{\mathrm{op}} &\longrightarrow \mathcal{S}\mathrm{paces}_0, \\ y &\longmapsto \mathrm{Map}_{\mathcal{C}}(y, x) \end{aligned}$$

を充たす<sup>a</sup>ような  $(\infty, 1)$ -圏の関手  $y_{[0]}(x) \in \mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathcal{C})_0 = \mathrm{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\mathcal{C}^{\mathrm{op}}, \mathcal{S}\mathrm{paces})$  を対応付けるもののこと<sup>b</sup>.

<sup>a</sup>  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}$  において, 対象  $x, y \in \mathcal{C}_0$  の間の射の空間  $\mathrm{Map}_{\mathcal{C}}(x, y)$  は Kan 複体を成すのだった [?, Tag 01JC].

<sup>b</sup> 厳密な構成については [?, Tag 03NF] を参照.

## 1.2.7 層状化空間の接構造

### 定義 1.31: enter-path category

conically smooth な層状化空間  $X \in \mathrm{Ob}(\mathbf{Strat})$  の enter-path  $(\infty, 1)$ -category とは,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{B}\mathrm{sc}$  のスライス圏

$$\mathcal{E}\mathrm{nt}\mathbf{r}(X) := \mathcal{B}\mathrm{sc}_{/X}$$

のこと.

### 定義 1.32: tangent classifier

$\iota: \mathcal{B}\mathrm{sc} \hookrightarrow \mathbf{Snglr}$  を包含とする. tangent classifier とは,  $(\infty, 1)$ -圏の関手

$$\tau: \mathbf{Snglr} \xrightarrow{y} \mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathbf{Snglr}) \xrightarrow{\iota^*} \mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathcal{B}\mathrm{sc})$$

のこと.

定義 1.30 より, tangent classifier は conically smooth な層状化空間  $X \in \mathbf{Snglr}_0$  に対して  $(\infty, 1)$ -圏の表現可能前層

$$\tau_{[0]}(X) = \mathrm{Map}_{\mathcal{B}\mathrm{sc}}(-, X) \in \mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathcal{B}\mathrm{sc})_0 \quad (1.2.5)$$

を対応付ける.

定理 1.1 により, tangent classifier  $\tau$  のことを

$$\tau: \mathbf{Snglr} \xrightarrow{y} \mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathbf{Snglr}) \xrightarrow{\iota^*} \mathbf{PSh}_{(\infty, 1)}(\mathcal{B}\mathrm{sc}) \xrightarrow{\simeq} \mathcal{R}\mathrm{fib}_{\mathcal{B}\mathrm{sc}}$$



と見做すこともできる．このとき， $\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}\mathbf{sc}}$  の構成および  $(\infty, 1)$ -前層 (1.2.5) に対する定理 1.1 の具体的構成から，conically smooth な層状化空間  $X \in \mathbf{Snglr}_0$  に対して定まる  $(\infty, 1)$ -圏の右ファイブレーション  $\tau_{[0]}(X) \in (\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}\mathbf{sc}})_0$  とは忘却関手

$$\tau_{[0]}(X): \mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}(X) \longrightarrow \mathcal{B}\mathbf{sc}$$

のことである．この忘却関手を以下では  $\tau_X := \tau_{[0]}(X)$  と書く．

### 定義 1.33: $\mathcal{B}$ -多様体

- $(\mathcal{B}, f)$  構造<sup>a</sup>とは， $(\infty, 1)$ -圏の右ファイブレーション  $(\mathcal{B} \xrightarrow{f} \mathcal{B}\mathbf{sc}) \in (\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}\mathbf{sc}})_0$  のこと．
- $(\mathcal{B}, f)$  構造  $\mathcal{B} \xrightarrow{f} \mathcal{B}\mathbf{sc}$  を 1 つ固定する．このとき， $\mathcal{B}$ -多様体 ( $\mathcal{B}$ -manifold) の成す  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{M}\mathbf{fld}(\mathcal{B})$  とは， $(\infty, 1)$ -圏の引き戻し

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{M}\mathbf{fld}(\mathcal{B}) & \longrightarrow & (\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}\mathbf{sc}})/f \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow \text{forget} \\ \mathbf{Snglr} & \xrightarrow{\tau} & \mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}\mathbf{sc}} \end{array}$$

のこと<sup>b</sup>．特に， $\mathcal{M}\mathbf{fld}(\mathcal{B})_0$  の元は以下の 2 つのデータから成り， $\mathcal{B}$ -多様体と呼ばれる：

- conically smooth な層状化空間  $X \in \mathbf{Snglr}_0$
- $(\infty, 1)$ -圏の関手  $g: \mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}(X) \longrightarrow \mathcal{B}$

これらは以下の条件を充たさねばならない：

(lift of tangent classifier)

$\mathbf{sSet}$  における以下の図式は可換である：

$$\begin{array}{ccc} & & \mathcal{B} \\ & \nearrow g & \downarrow f \\ \mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}(X) & \xrightarrow{\tau_X} & \mathcal{B}\mathbf{sc} \end{array}$$

<sup>a</sup> [?, Definition 1.1.6] では  $(\infty, 1)$ -category of basics と呼ばれている．

<sup>b</sup> 実際には【例 1.2.5】より  $(\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}\mathbf{sc}})/f \longrightarrow \mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathcal{B}\mathbf{sc}}$  が右ファイブレーション（したがって図 1.1 よりアイソファイブレーション）なので，補題 1.4, 1.5 からこの  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻しは  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  の引き戻しとして計算できる．

以降の小節で定義 1.33 を解説しよう．特に，定理 1.3 により，tangent classifier  $\tau_X$  は conically smooth な層状化空間  $X \in \mathbf{Snglr}_0$  の上に「stratum-wise」に（通常の意味の）接束をアサインしていることが分かる．ここで言う「stratum-wise」とは， $X$  が元来持っている層状化のことではなく，補題 1.10 による  $X$  の  $[\mathcal{B}\mathbf{sc}]$ -層状化によるものである．補題 1.11 により， $[\mathcal{B}\mathbf{sc}]$ -層状化による  $X$  の  $[U] \in [\mathcal{B}\mathbf{sc}]$ -層はただの  $C^\infty$ -多様体であることが分かり，その上の接束を考えることができるのである．

### 1.2.8 $\mathcal{B}\mathbf{sc}$ における Hom

しばらくの間，basic  $U := ((\mathbb{R}^n \rightarrow [0]) \times C(Z \rightarrow P), \mathcal{A}_Z) \in \mathbf{Ob}(\mathcal{B}\mathbf{sc})$  を 1 つ固定する．これまでと同様に，層状化空間  $C(Z \xrightarrow{s} P) = (C(Z) \xrightarrow{C(s)} C(P))$  のコーンポイント  $[0, *] \in C(Z) = \frac{\mathbb{R}_{\geq 0} \times Z}{\{0\} \times Z}$  のことを pt

と書き,  $\mathbb{R}^n \times \{\text{pt}\} \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z)$  のことを  $\mathbb{R}^n$  と略記することにする. さらに, 点  $(0, \text{pt}) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z)$  のことを **0** と略記し,  $U$  の**原点** (origin) と呼ぶことにする.

! 以下では, 混乱が生じにくい場合は層状化空間  $(X \xrightarrow{s} P)$  の  $s$  と  $P$  を省略する. さらに, **conically smooth atlas** を明示しない.

いま, 特異単体の変種として, **conically smooth な層状化空間**  $X \in \text{Ob}(\mathbf{Strat})$  の滑らかな特異単体 (smooth singular simplicial set) と呼ばれる単体的集合を

$$\begin{aligned} \text{Sing}^{\text{sm}}(X): \Delta^{\text{op}} &\longrightarrow \mathbf{Sets}, \\ [n] &\longmapsto \text{Hom}_{\mathbf{Strat}}(\Delta_e^n, X), \\ ([m] \xrightarrow{\alpha} [n]) &\longmapsto (\text{Sing}^{\text{sm}}(X)_m \xrightarrow{\Delta_e(\alpha)^*} \text{Sing}^{\text{sm}}(X)_n) \end{aligned}$$

と定義する\*5. これは Kan 複体になる. ここで (1.1.1) を思い出して, 写像

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}: \mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n &\longrightarrow \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, U), \\ (t, p) &\longmapsto \left( (v, [s, z]) \mapsto (tv + p, [ts, z]) \right) =: \tilde{\gamma}_{t,p} \end{aligned}$$

を考える. これを Kan 複体の間の射 (i.e. 自然変換)

$$\gamma: \text{Sing}^{\text{sm}}(\mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, U) \quad (1.2.6)$$

へと格上げすることができる. 実際,  $\forall m \geq 0$  に対して,  $m$ -単体はそれぞれ

$$\begin{aligned} \text{Sing}^{\text{sm}}(\mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n)_m &= \text{Hom}_{\mathbf{Strat}}(\Delta_e^m, \mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n), \\ \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, U)_m &= \{ f \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(\Delta_e^m \times U, \Delta_e^m \times U) \mid \text{proj}_{\Delta_e^m} \circ f = \text{proj}_{\Delta_e^m} \} \end{aligned}$$

であったから,

$$\begin{aligned} \gamma_{[m]}: \text{Sing}^{\text{sm}}(\mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n)_m &\longrightarrow \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, U)_m, \\ (x \mapsto (t(x), p(x))) &\longmapsto \left( (x, u) \mapsto (x, \tilde{\gamma}_{t(x), p(x)}(u)) \right) =: \gamma_{[m]t,p} \end{aligned}$$

と定義すればよい.

さらに, 勝手な **conically smooth な層状化空間**  $Z \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr})$  に対して, その**自己同相群** (automorphism group)

$$\text{Aut}(Z): \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

を, Kan 複体  $\text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(Z, Z)$  の部分 Kan 複体として次のように定義する:

$$\text{Aut}(Z)_m := \{ f \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(Z, Z)_m \mid \forall x \in \Delta_e^m, \exists (\text{proj}_Z \circ f|_{\{x\} \times Z})^{-1} \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(Z, Z) \}$$

なお,  $\forall m \geq 0$  に対し集合  $\text{Aut}(Z)_m$  は  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Snglr}$  における 1-射の合成に関して群になるため, Kan 複体  $\text{Aut}(Z)$  は**群的な Kan 複体** (group-like Kan complex)\*6 と見做することができる.

\*5 滑らかな特異単体と言ったときは幾何学的  $n$ -単体を用いることが多く, このように定義することは稀だと思う.

\*6 Kan 複体であって,  $\Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Grp}$  でもあるもの. 従って, homotopy hypothesis より位相群と見做することができる.

### 定義 1.34: 層状化された一般線形群

勝手な **basic**  $U := \mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z) \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$  を与える.

Kan 複体  $\text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(U, U)$  の部分 Kan 複体<sup>a</sup>

$$\text{GL}(U): \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

を次のように定義し、**層状化された一般線形群**と呼ぶ:

$$\mathbf{GL}(U)_m := \{ T \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(U, U)_m \mid \forall (t, p) \in \text{Sing}^{\text{sm}}(\mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n)_m, T \circ \gamma_{[m]t, p} = \gamma_{[m]t, (Tp)_{\mathbb{R}^n}} \circ T \}$$

ただし、以下の合成写像を  $(Tp)_{\mathbb{R}^n}: \Delta_e^m \longrightarrow \mathbb{R}^n$  と略記した:

$$\begin{array}{ccccccc} \Delta_e^m & \xrightarrow{\text{diag}} & \Delta_e^m \times \Delta_e^m & \xrightarrow{\text{Id} \times p} & \Delta_e^m \times \mathbb{R}^n & \xrightarrow{T|_{\Delta_e^m \times \mathbb{R}^n \times \{\text{pt}\}}} & \Delta_e^m \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z) & \xrightarrow{\text{proj}_{\mathbb{R}^n}} & \mathbb{R}^n, \\ x & \longmapsto & (x, x) & \longmapsto & (x, p(x)) & \longmapsto & T(x, p(x), \text{pt}) & \longmapsto & \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T(x, p(x), \text{pt}) \end{array}$$

<sup>a</sup> より正確には、この時点では部分単体的集合  $\text{GL}(U) \subset \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(U, U)$  が Kan 複体であることは非自明である。補題 1.6 により  $\text{GL}(U)$  が群的な単体的集合 (単体的群) こと, i.e.  $\text{GL}(U): \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Grp}$  であることが分かり、故に [?, Tag 00MG] から Kan 複体であることが分かるのである。

Kan 複体  $\text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(U, U)$  の部分 Kan 複体

$$\text{O}(U): \Delta^{\text{op}} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

を次のように定義し、**層状化された直交群**と呼ぶ:

$$\text{O}(U) := \text{Sing}^{\text{sm}}(\text{O}(n)) \times \text{Aut}(Z)$$

### 【例 1.2.7】 通常の一般線形群

$Z = \emptyset$  の場合を考える。このとき  $U = \mathbb{R}^n$  なので、Kan 複体の射 (1.2.6) とは単に

$$\gamma_{[m]}: \left( x \mapsto (t(x), p(x)) \right) \longmapsto \left( (x, u) \mapsto (x, t(x)u + p(x)) \right)$$

のことであり、 $T \in \text{GL}(U)_m$  とは  $\forall (t, p) \in \text{Sing}^{\text{sm}}(\mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n)$  および  $\forall (x, u) \in \Delta_e^m \times U = \Delta_e^m \times \mathbb{R}^n$  に対して

$$\begin{aligned} T \circ \gamma_{[m]t, p}(x, u) &= T(x, t(x)u + p(x)) \\ &= \gamma_{[m]t, \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T|_{\mathbb{R}^n}(p)} \circ T(x, u) \\ &= \left( x, t(x) \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T(x, u) + \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T(x, p(x)) \right) \end{aligned}$$

が成り立つことを意味する。i.e.  $\forall x \in \Delta_e^m$  に対して、 $T_x := \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T|_{\{x\} \times \mathbb{R}^n}: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$  とおくと

$$T_x(t(x)u + p(x)) = t(x)T_x u + T_x p(x)$$

が成り立つため、 $T_x$  は線型写像である。(1, 1)-圏 **Snglr** の定義より  $T$  は開埋め込みであり、単射である。次元の等しい有限次元ベクトル空間の間の単射線型写像  $T_x$  は全単射でもあり、 $T_x \in \text{GL}(n, \mathbb{R})$  だと分かった。この事実は、Kan 複体の同型  $\text{GL}(\mathbb{R}^n) \cong \text{Sing}^{\text{sm}}(\text{GL}(n, \mathbb{R}))$  を意味する。

さて、部分 Kan 複体  $\text{Aut}^0(U) \subset \text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}^0(U, U) \subset \text{Hom}_{\text{Snglr}}(U, U)$  を次のように定義しよう：

$$\begin{aligned}\text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}^0(U, U)_m &:= \{ f \in \text{Hom}_{\text{Snglr}}(U, U)_m \mid \forall x \in \Delta_e^m, f(x, \mathbf{0}) = (x, \mathbf{0}) \}, \\ \text{Aut}^0(U)_m &:= \text{Aut}(U)_m \cap \text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}^0(U, U)_m\end{aligned}$$

**補題 1.6: 層状化された一般線形群は原点を保つ自己同相群**

$$\text{GL}(U) \subset \text{Aut}^0(U) \subset \text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}^0(U, U)$$

さらに、 $\forall m \geq 0, \forall S, T \in \text{GL}(U)_m$  に対して  $S \circ T \in \text{GL}(U)$  が成り立つ。i.e.  $\text{GL}(U)$  は群的な Kan 複体である。

**証明**  $\forall m \geq 0$  および  $\forall T \in \text{GL}(U)_m$  を 1 つ固定する。

$T \in \text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}^0(U, U)_m$

$\forall x \in \Delta_e^m$  および  $\forall t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  に対して  $\gamma_{[m]t, 0}(x, \mathbf{0}) = (x, \mathbf{0})$  が成り立つ<sup>\*7</sup>ので、

$$\begin{aligned}(x, \text{proj}_U \circ T(x, \mathbf{0})) &= T(x, \mathbf{0}) \\ &= T \circ \gamma_{[m]t, 0}(x, \mathbf{0}) \\ &= \gamma_{[m]t, (T0)_{\mathbb{R}^n}} \circ T(x, \mathbf{0}) \\ &= \gamma_{[m]t, \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T(x, \mathbf{0})}(x, \text{proj}_U \circ T(x, \mathbf{0}))\end{aligned}\tag{1.2.7}$$

が言える<sup>\*8</sup>。ここで  $\text{proj}_U \circ T(x, \mathbf{0}) = (\text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T(x, \mathbf{0}), \text{proj}_{\mathbb{C}(Z)} \circ T(x, \mathbf{0})) \in U$  であるから、 $v_0 := \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T(x, \mathbf{0}), [s_0, z_0] := \text{proj}_{\mathbb{C}(Z)} \circ T(x, \mathbf{0})$  とおくと (1.2.7) は

$$(v_0, [s_0, z_0]) = (tv_0 + v_0, [ts_0, z_0])$$

を意味する。いま  $t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  は任意であったから、 $v_0 = 0, s_0 = 0$  でなくてはならない。i.e.  $T(x, \mathbf{0}) = (x, v_0, [s_0, z_0]) = (x, 0)$  が示された。

$T \in \text{Aut}^0(U, U)_m$

$\forall x \in \Delta_e^m$  を 1 つ固定する。(1, 1)-圏 **Snglr** の定義より  $T \in \text{Hom}_{\text{Snglr}}(\Delta_e^m \times U, \Delta_e^m \times U)$  は開埋め込みであるから単射であり、従って  $T_x := \text{proj}_U \circ T|_{\{x\} \times U} \in \text{Hom}_{\text{Snglr}}(U, U)$  もまた開埋め込みであって単射である。故に  $T_x$  が全射であること、i.e.  $T_x(U) = U$  であることを示せば十分である。実際、原点の勝手な開近傍  $\mathbf{0} \in O \subset U$  を  $\tilde{\gamma}_{t, 0}$  によって拡大することで  $U$  の開基を作ることができ、かつ  $T \circ \gamma_{t, 0} = \gamma_{t, 0} \circ T$  が成り立つことが先に示されているので  $T_x$  は全射である [?, Lemma 4.3.4.]。

**合成について閉じていること**

$\forall (x, p) \in \Delta_e^m \times \mathbb{R}^n$  に対して  $(x, p, \text{pt}) = \gamma_{[m]1, p}(x, \mathbf{0})$  が成り立つ<sup>\*9</sup>から、

$$\begin{aligned}T(x, p, \text{pt}) &= T \circ \gamma_{[m]1, p}(x, \mathbf{0}) \\ &= \gamma_{[m]1, (Tp)_{\mathbb{R}^n}} \circ T(x, \mathbf{0}) \\ &= \gamma_{[m]1, (Tp)_{\mathbb{R}^n}}(x, \mathbf{0}) \in \{x\} \times \mathbb{R}^n \times \{\text{pt}\}\end{aligned}$$

<sup>\*7</sup> 定数写像  $\Delta_e^m \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, x \mapsto t$  のことを  $t$  と略記している。

<sup>\*8</sup> 3 つ目の等号で登場する  $0$  とは、定数写像  $\Delta_e^m \rightarrow \mathbb{R}^n, x \mapsto 0$  のことである。

<sup>\*9</sup> 定数写像  $\Delta_e^m \rightarrow \mathbb{R}^n, x \mapsto p$  のことを  $p$  と略記している。

が言える, i.e.  $\mathrm{GL}(U)_m$  の任意の元はコーンポイントを保存することに注意する.

ここでもう一つの  $\forall S \in \mathrm{GL}(U)_m$  を固定する.  $\forall (t, p) \in \mathrm{Sing}^{\mathrm{sm}}(\mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n)_m$  および  $\forall x \in \Delta_e^m$  に対して

$$\begin{aligned} ((S \circ T)p)_{\mathbb{R}^n}(x) &= \mathrm{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ (S \circ T)(x, p(x), \mathrm{pt}) \\ &= \mathrm{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ S\left(x, \mathrm{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T(x, p(x), \mathrm{pt}), \mathrm{proj}_{\mathbb{C}(Z)} \circ T(x, p(x), \mathrm{pt})\right) \\ &= \mathrm{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ S\left(x, (Tp)_{\mathbb{R}^n}(x), \mathrm{pt}\right) \\ &= (S(Tp)_{\mathbb{R}^n})_{\mathbb{R}^n}(x) \end{aligned}$$

と計算できるため,

$$\begin{aligned} (S \circ T) \circ \gamma_{[m]t, p} &= S \circ \gamma_{[m]t, (Tp)_{\mathbb{R}^n}} \circ T \\ &= \gamma_{[m]t, (S(Tp)_{\mathbb{R}^n})_{\mathbb{R}^n}} \circ S \circ T \\ &= \gamma_{[m]t, ((S \circ T)p)_{\mathbb{R}^n}} \circ (S \circ T) \end{aligned}$$

i.e.  $S \circ T \in \mathrm{GL}(U)_m$  が言えた. ■

#### 補題 1.7: 層状化された直交群は一般線形群の部分 Kan 複体

$$\mathrm{O}(U) \subset \mathrm{GL}(U)$$

**証明**  $\forall m \geq 0$  および  $\forall T := (A, f) \in \mathrm{O}(U)_m = \mathrm{Sing}^{\mathrm{sm}}(\mathrm{O}(n))_m \times \mathrm{Aut}(Z)_m$  を 1 つ固定する. まず,  $\forall (x, (v, [s, z])) \in \Delta_e^m \times U = \Delta_e^m \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z)$  に対して

$$T(x, (v, [s, z])) := \left(x, (A(x)v, [s, \mathrm{proj}_Z \circ f(x, z)])\right)$$

と定めることで  $T \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{B}\mathrm{sc}}^0(U, U)_m$  と見做せる. このとき,  $\forall (t, p) \in \mathrm{Sing}^{\mathrm{sm}}(\mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n)_m$  に対して

$$\begin{aligned} (Tp)_{\mathbb{R}^n}(x) &= \mathrm{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T\left(x, (p(x), [0, *])\right) \\ &= \mathrm{proj}_{\mathbb{R}^n}\left(x, (A(x)p(x), [0, *])\right) \\ &= A(x)p(x) \end{aligned}$$

および

$$\begin{aligned} T \circ \gamma_{[m]t, p}(x, (v, [s, z])) &= T\left(x, (t(x)v + p(x), [t(x)s, z])\right) \\ &= \left(x, (t(x)A(x)v + A(x)p(x), [t(x)s, \mathrm{proj}_Z \circ f(x, z)])\right) \\ &= \left(x, \tilde{\gamma}_{t(x), A(x)p(x)}(A(x)v, [s, \mathrm{proj}_Z \circ f(x, z)])\right) \\ &= \gamma_{[m]t, (Tp)_{\mathbb{R}^n}} \circ T(x, (v, [s, z])) \end{aligned}$$

が成り立つため  $T \in \mathrm{GL}(U)_m$  が言えた. ■

**命題 1.2:  $O(U)$  へのレトラクション**

Kan 複体の包含写像

$$O(U) \xrightarrow{i_1} GL(U) \xrightarrow{i_2} \text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}^0(U, U) \xrightarrow{i_3} \text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}(U, U)$$

は全て Kan 複体のホモトピー同値である.

**証明**  $\forall A \in GL(n, \mathbb{R}^n)$  を 1 つとる.  $A$  を列ベクトルに分割し, それを  $A = [a_1, \dots, a_n]$  と書こう. このとき, 正規直交基底  $e_1, \dots, e_n \in \mathbb{R}^n$  と上三角行列  $R_A \in M(n, \mathbb{R})$  を次のようにして得る (Gram-Schmidt の正規直交化):

$$e_i := \begin{cases} \frac{a_1}{\|a_1\|}, & i = 1 \\ \frac{a_i - \sum_{k=1}^{i-1} \langle e_k | a_i \rangle e_k}{\|a_i - \sum_{k=1}^{i-1} \langle e_k | a_i \rangle e_k\|}, & 1 < i \leq n \end{cases}$$

$$R_{Aij} := \begin{cases} \|a_1\|, & i = j = 1 \\ \|a_i - \sum_{k=1}^{i-1} \langle e_k | a_i \rangle e_k\|, & 1 < i = j \leq n \\ \langle e_i | a_j \rangle, & i < j \\ 0, & i > j \end{cases}$$

ただし  $\|\cdot\|$  は  $\mathbb{R}^n$  の標準的なノルムである. ここで  $Q_A := [e_1, \dots, e_n]$  とおくと  $A = Q_A R_A$  が成り立つ. 連続写像

$$\begin{aligned} \text{GrSm}: GL(n, \mathbb{R}) &\longrightarrow O(n), \\ A &\longmapsto Q_A \end{aligned} \tag{1.2.8}$$

は, 包含写像  $i_0: O(n) \hookrightarrow GL(n)$  について  $\text{GrSm} \circ i_0 = \text{Id}_{O(n)}$  を充たす.

$i_1$  のホモトピー逆

$\forall T \in GL(U)_m$  および  $\forall (x, (v, [0, *])) \in \Delta_e^m \times \mathbb{R}^n \times \mathcal{C}(Z)$  をとる. 補題 1.6 の証明より  $T$  はコーンポイントを保存するから, 【例 1.2.7】と同様にして  $\forall (t, p) \in \text{Sing}^{\text{sm}}(\mathbb{R}_{\geq 0}, \mathbb{R}^n)_m$  に対して

$$\begin{aligned} &T(x, (t(x)v + p(x), [0, *])) \\ &= T \circ \gamma_{[m]t, p}(x, (v, [0, *])) \\ &= \gamma_{[m]t, (Tp)_{\mathbb{R}^n}} \circ T(x, v, [0, *]) \\ &= \left( x, \left( t(x) \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T(x, v, [0, *]) + \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T(x, p(x), [0, *]), [0, *] \right) \right) \end{aligned}$$

と計算できる. i.e.  $T_x := \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ T|_{\{x\} \times \mathbb{R}^n \times \{[0, *]\}}: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$  は線型写像であり,  $T$  が開埋め込みであることから  $T_x \in GL(n, \mathbb{R})$  が言える. 故に連続写像 (1.2.8) を  $T_x$  に適用することができて,  $\text{GrSm}(T_x) \in O(n)$  を得る.

一方,  $\forall (x, (v, [s, z])) \in \Delta_e^m \times \mathbb{R}^n \times \mathcal{C}(Z)$  に対して  $(x, (v, [s, z])) = \gamma_{[m]s, v}(x, (0, [1, z]))$  が成り立つ<sup>\*10</sup>ので,

$$T(x, (v, [s, z]))$$

<sup>\*10</sup>  $(s, v) \in \text{Sing}^{\text{sm}}(\mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n)_m$  とは, 定数写像  $\Delta_e^m \longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n, x \longmapsto (s, v)$  のことである.

$$\begin{aligned}
&= T \circ \gamma_{[m]s, v}(x, (0, [1, z])) \\
&= \gamma_{[m]s, (Tv)_{\mathbb{R}^n}} \circ T(x, (0, [1, z]))
\end{aligned}$$

が言える。故に、

$$\text{proj}_U \circ T(x, (v, [s, z])) =: \left( T_{x, v, [s, z]}^{\mathbb{R}^n}, [T_{x, v, [s, z]}^{\mathbb{R} \geq 0}, T_{x, v, [s, z]}^Z] \right)$$

とおくと

$$[T_{x, v, [s, z]}^{\mathbb{R} \geq 0}, T_{x, v, [s, z]}^Z] = [sT_{x, 0, [1, z]}^{\mathbb{R} \geq 0}, T_{x, 0, [1, z]}^Z]$$

が成り立つ。

以上の考察から、写像

$$\begin{aligned}
r_1[m]: \text{GL}(U)_m &\longrightarrow \text{O}(U)_m, \\
T &\longmapsto \left( (x, v, [s, z]) \mapsto (x, \text{GrSm}(T_x)(v), [s, T_{x, 0, [1, z]}^Z]) \right)
\end{aligned}$$

が定まり、Kan 複体の射

$$r_1: \text{GL}(U) \longrightarrow \text{O}(U)$$

を構成する。構成より明らかに  $r_1 \circ i_1 = \text{Id}_{\text{O}(U)}$  が成り立つ。その上、Kan 複体の射

$$H \in \mathcal{F}\mathbf{un}(\text{GL}(U), \text{GL}(U))_1 \cong \text{Hom}_{\mathbf{Kan}}(\text{Sing}^{\text{sm}}([0, 1]) \times \text{GL}(U), \text{GL}(U))$$

の  $m$ -射の対応  $H_m: \text{Sing}^{\text{sm}}([0, 1])_m \times \text{GL}(U)_m \longrightarrow \text{GL}(U)_m$  を次のように定義すると、 $H$  が  $\text{Id}_{\text{GL}(U)}$  と  $i_1 \circ r_1$  を繋ぐホモトピーとなる。 i.e.  $r_1$  が  $i_1$  のホモトピー逆であることが示された：

$$(t, T) \longmapsto \left( (x, v, [s, z]) \mapsto (x, (1-t(x))T_{x, v, [s, z]}^{\mathbb{R}^n} + t(x)\text{GrSm}(T_x)(v), [(1-t(x))T_{x, 0, [1, z]}^{\mathbb{R} \geq 0} + t(x)s, T_{x, 0, [1, z]}^Z]) \right)$$

## $i_2$ のホモトピー逆

$\forall f \in \text{Hom}_{\mathcal{B}\mathbf{sc}}^0(U, U)_m$  および  $\forall x \in \Delta_e^m$  に対して、 $f_x := \text{proj}_U \circ f|_{\{x\} \times U} \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}^0(U, U)$  とおこう。このとき  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{B}\mathbf{sc}$  の定義において登場する射は全て **conically smooth** なので、 $f_x$  の微分

$$Df_x: T\mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z) \longrightarrow T\mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z)$$

が存在する。具体的には、

$$\begin{aligned}
&Df_x((v, p), [t, z]) \\
&= \lim_{s \rightarrow +0} \gamma^{-1} \circ f_{x\Delta} \circ \gamma(s; (v, p), [t, z]) \\
&= \lim_{s \rightarrow +0} \gamma^{-1} \circ f_{x\Delta}(s; (sv + p, p), [st, z]) \\
&= \lim_{s \rightarrow +0} \gamma^{-1}(s; f_x|_{\mathbb{R}^n}(sv + p), f_x(p, [st, z])) \\
&= \left( \left( \lim_{s \rightarrow +0} \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(sv + p) - \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ f_x(p, [st, z])}{s}, f_x|_{\mathbb{R}^n}(p) \right), \text{proj}_{\mathbb{C}(Z)} \left( \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, -\frac{\text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ f_x(p, [st, z])}{s}} \circ f_x(p, [st, z]) \right) \right) \\
&= \left( \left( \lim_{s \rightarrow +0} \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(sv + p) - \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ f_x(p, [st, z])}{s}, f_x|_{\mathbb{R}^n}(p) \right), \text{proj}_{\mathbb{C}(Z)} \left( \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ f_x(p, [st, z]) \right) \right)
\end{aligned}$$

である<sup>\*11</sup>. さらに,  $T\mathbb{R}^n \approx \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$  の底空間<sup>\*12</sup>の勝手な元  $p \in \mathbb{R}^n$  に対して

$$\begin{aligned} D_p f_x &:= \text{proj}_{\mathbb{R}^n \times \{f_x|_{\mathbb{R}^n}(p)\} \times C(Z)} \circ Df_x|_{\mathbb{R}^n \times \{p\} \times C(Z)} \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(U, U), \\ D_{p[m]} f &:= \left( (x, u) \mapsto (x, D_p f_x(u)) \right) \in \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, U)_m \end{aligned}$$

とおこう. 特に,  $D_{0[m]} f \in \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}^0(U, U)_m$  であることに注意する. あからさまには

$$\begin{aligned} & D_0 f_x(v, [t, z]) \\ &= \left( \lim_{s \rightarrow +0} \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(sv) - \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ f_x(0, [st, z])}{s}, \text{proj}_{C(Z)} \left( \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ f_x(0, [st, z]) \right) \right) \\ &= \left( \lim_{s \rightarrow +0} \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(sv) - \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ f_x(\mathbf{0})}{s}, \text{proj}_{C(Z)} \left( \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ f_x(0, [st, z]) \right) \right) \\ &= \left( \lim_{s \rightarrow +0} \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(sv)}{s}, \text{proj}_{C(Z)} \left( \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ f_x(0, [st, z]) \right) \right) \\ &= \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ f_x \Delta \circ \tilde{\gamma}_{s, 0}(v, [t, z]) \end{aligned}$$

と書ける.

以上の準備の下, まず  $\forall m \geq 0$  および  $\forall f \in \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}^0(U, U)_m$  に対して  $D_{0[m]} f \in \text{GL}(U)_m$  であること, i.e. Kan 複体の射

$$D_0: \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}^0(U, U) \longrightarrow \text{GL}(U)$$

が定まることを示そう. 実際,  $\forall (t, p) \in \text{Sing}^{\text{sm}}(\mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n)_m, \forall (x, u) \in \Delta_e^m \times U$  に対して

$$\begin{aligned} (D_{0[m]} f(p))_{\mathbb{R}^n}(x) &= \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ D_{0[m]} f(x, p(x), \text{pt}) \\ &= \text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ D_0 f_x(p(x), \text{pt}) \\ &= \lim_{s \rightarrow +0} \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(sp(x))}{s} \end{aligned}$$

であるから,

$$\begin{aligned} & D_{0[m]} f \circ \gamma_{[m]t, p}(x, u) \\ &= \left( x, D_0 f_x \circ \tilde{\gamma}_{t(x), p(x)}(u) \right) \\ &= \left( x, \left( \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ f_x \Delta \circ \tilde{\gamma}_{s, 0} \right) \circ \tilde{\gamma}_{t(x), p(x)}(u) \right) \\ &= \left( x, \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ f_x \Delta \circ \tilde{\gamma}_{st(x), sp(x)}(u) \right) \\ &= \left( x, \left( \lim_{s \rightarrow +0} \left( \tilde{\gamma}_{1, \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(sp(x))}{s}} \circ \tilde{\gamma}_{1, -\frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(sp(x))}{s}} \right) \circ \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ f_x \Delta \circ \tilde{\gamma}_{st(x), sp(x)} \right)(u) \right) \\ &= \left( x, \left( \lim_{r \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{1, \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(rp(x))}{r}} \right) \circ \left( \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{1, -\frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(sp(x))}{s}} \circ \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ f_x \Delta \circ \tilde{\gamma}_{st(x), sp(x)} \right)(u) \right) \\ &= \left( x, \left( \lim_{r \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{1, \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(rp(x))}{r}} \right) \circ \left( \lim_{s \rightarrow +0} \lim_{a \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{1, -\frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(ap(x))}{s}} \circ \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ f_x \Delta \circ \tilde{\gamma}_{st(x), ap(x)} \right)(u) \right) \\ &= \left( x, \left( \lim_{r \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{1, \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(rp(x))}{r}} \right) \circ \left( \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ \left( \lim_{a \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{1, -\frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(ap(x))}{s}} \circ f_x \Delta \circ \tilde{\gamma}_{st(x), ap(x)} \right) \right)(u) \right) \\ &= \left( x, \left( \lim_{r \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{1, \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(rp(x))}{r}} \right) \circ \left( \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}, 0} \circ (\tilde{\gamma}_{1, 0} \circ f_x \Delta \circ \tilde{\gamma}_{t(x)s, 0}) \right)(u) \right) \end{aligned}$$

<sup>\*11</sup>  $\tilde{\gamma}$  の定義から,  $\forall (t, p) \in \mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}^n$  に対して  $\text{proj}_{C(Z)} \circ \tilde{\gamma}_{t, p} = \text{proj}_{C(Z)} \circ \tilde{\gamma}_{t, 0}$  が成り立つ.

<sup>\*12</sup> 第二成分である.



$$\begin{aligned}
&= \left( x, \left( \lim_{r \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_1, \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(rp(x))}{r} \right) \circ \left( \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}}, 0 \circ f_{x\Delta} \circ \tilde{\gamma}_{t(x)s, 0} \right)(u) \right) \\
&= \left( x, \left( \lim_{r \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_1, \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(rp(x))}{r} \right) \circ \left( \lim_{s' \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{t(x)}{s'}}, 0 \circ f_{x\Delta} \circ \tilde{\gamma}_{s', 0} \right)(u) \right) \\
&= \left( x, \left( \lim_{r \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_1, \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(rp(x))}{r} \circ \gamma_{t(x), 0} \right) \circ \left( \lim_{s' \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s'}}, 0 \circ f_{x\Delta} \circ \tilde{\gamma}_{s', 0} \right)(u) \right) \\
&= \left( x, \left( \lim_{r \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{t(x)}, \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(rp(x))}{r} \right) \circ \left( \lim_{s' \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s'}}, 0 \circ f_{x\Delta} \circ \tilde{\gamma}_{s', 0} \right)(u) \right) \\
&= \left( x, \tilde{\gamma}_{t(x), \lim_{r \rightarrow +0} \frac{f_x|_{\mathbb{R}^n}(rp(x))}{r}} \circ D_0 f_x(u) \right) \\
&= \gamma_{[m]t, (D_0[m]f(p))_{\mathbb{R}^n}} \circ D_0[m]f(x, u)
\end{aligned}$$

と計算できる<sup>\*13</sup>.

さらに、 $\text{GL}(U)$  の定義から  $\forall T \in \text{GL}(U)_m$  および  $\forall t > 0$  に対して

$$\gamma_{[m]\frac{1}{t}, 0} \circ T \circ \gamma_{[m]t, 0} = T$$

が成り立つので、微分の一意性より

$$\begin{aligned}
D_{0[m]}T(x, u) &= \left( x, \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{\frac{1}{s}}, 0 \circ T_{x\Delta} \circ \tilde{\gamma}_{s, 0}(u) \right) \\
&= \lim_{s \rightarrow +0} \tilde{\gamma}_{[m]\frac{1}{s}, 0} \circ T \circ \gamma_{[m]s, 0}(x, u) \\
&= T(x, u)
\end{aligned}$$

だと分かる. i.e.  $D_0 \circ i_2 = \text{Id}_{\text{GL}(U)}$  である.

その上,

$$\begin{aligned}
&\text{Sing}^{\text{sm}}([0, 1]) \times \text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}^0(U, U) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}^0(U, U), \\
&(s, f) \longmapsto \gamma_{\frac{1}{s}, 0} \circ f \circ \gamma_{s, 0}
\end{aligned}$$

がちょうど  $i_2 \circ D_0$  と  $\text{Id}_{\text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}^0(U, U)}$  を繋ぐホモトピーになっており、 $i_2$  のホモトピー逆が  $D_0$  であることが示された.

### $i_3$ のホモトピー逆

ホモトピー逆は

$$\begin{aligned}
r_{3[m]} : \text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}(U, U)_m &\longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{B}\text{sc}}^0(U, U)_m, \\
f &\longmapsto \gamma_{[m]1, -\text{proj}_{\mathbb{R}^n} \circ f|_{\Delta_{\mathbb{E}}^m \times \{0\}}} \circ f
\end{aligned}$$

である.

■

## 1.2.9 $\mathcal{B}\text{sc}$ の構造

<sup>\*13</sup>  $\tilde{\gamma}_{t_2, p_2} \circ \tilde{\gamma}_{t_1, p_1}(v, [s, z]) = \tilde{\gamma}_{t_2, p_2}(t_1 v + p_1, [t_1 s, z]) = (t_2 t_1 v + t_2 p_1 + p_2, [t_2 t_1 s, z]) = \tilde{\gamma}_{t_2 t_1, t_2 p_1 + p_2}(v, [s, z])$  である. よって  $\tilde{\gamma}_{t, p}^{-1} = \tilde{\gamma}_{\frac{1}{t}, -\frac{p}{t}}$  が成り立つ.

補題 1.8:

2つの **basic**  $U := \mathbb{R}^n \times C(Z)$ ,  $V := \mathbb{R}^m \times C(W) \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$  であって,  $\text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, V) \neq \emptyset$  を満たすものとする. このとき, 以下の条件は全て同値である:

- (1)  $\text{depth}(U) = \text{depth}(V)$
- (2)  $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, V)$  であって,  $f(U) \cap (\mathbb{R}^m \times \{*\}) \neq \emptyset$  を満たすものが存在する.
- (3) **Kan 複体**  $\text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, V)$  の部分 **Kan 複体**

$$\mathcal{Iso}_{\mathbf{Bsc}}(U, V) \hookrightarrow \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, V)$$

を次のように定義すると, その包含写像は Kan 複体の弱ホモトピー同値である:

$$\mathcal{Iso}_{\mathbf{Bsc}}(U, V)_m := \{ f \in \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, V)_m \mid \forall x \in \Delta_e^m, \exists (\text{proj}_V \circ f|_{\{x\} \times U})^{-1} \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(V, U) \}$$

- (4)  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Bsc}$  において  $U$  と  $V$  は同型である.
- (5)  $n = m$  かつ,  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Strat}$  において  $Z$  と  $W$  は同型である.

**証明 (5)  $\implies$  (4)**

明らか.

**(4)  $\implies$  (3)**

命題 1.2 と同様の議論により従う.

**(3)  $\implies$  (2)**

$(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Bsc}$  における射の定義より明らか.

**(2)  $\implies$  (1)**

開埋め込み  $\mathbb{R}^n \times C(Z) \longrightarrow \mathbb{R}^m \times C(W)$  の存在より  $\dim(Z) = \dim(W)$  が言える.

**(1)  $\implies$  (5)**

$f \in \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, V)$  を 1 つとる. すると, **conically smoothness の定義**より conically smooth な層状化開埋め込み  $\tilde{f} \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_{\geq 0} \times Z, \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}_{\geq 0} \times W)$  が存在する.  $\tilde{f}$  を制限することで, conically smooth な層状化開埋め込み  $\bar{f} \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(\{0\} \times \{0\} \times Z, \{f(0)\} \times \{0\} \times W)$  を得る. このとき  $Z$  がコンパクトなので,  $\bar{f}(Z) \subset W$  もまたコンパクトである.  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{StTop}$  の定義より  $W$  は Hausdorff 空間なので,  $W$  のコンパクト部分空間である  $\bar{f}(Z)$  は閉部分集合である. 一方  $\bar{f}$  が開埋め込みであることから,  $\bar{f}(Z)$  は  $W$  の開部分集合でもある.  $W$  の開かつ閉な部分集合は,  $W$  の連結成分の直和しかない<sup>\*14</sup>. 然るにもし  $\bar{f}(Z) \subsetneq W$  だとすると, 空でない部分集合  $C(\bar{f}(Z)) \subsetneq C(W)$  が開かつ閉となり,  $C(W)$  の連結性に矛盾する. よって背理法から  $\bar{f}(Z) = W$  であること, i.e.  $\bar{f}: Z \longrightarrow W$  が  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Snglr}$  における同型射であることが示された.

■

$(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Bsc}$  における対象の同型類が成す集合を

$$\text{Ob}([\mathbf{Bsc}]) := \{ [U] \mid U \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc}) \}$$

<sup>\*14</sup> 位相空間の連結性の定義より, 各連結成分における開かつ閉な部分集合は空集合か自分自身のちょうど 2 つしかない.

と書く．この集合の元を**特異性タイプ** (singularity type) と呼ぼう．集合  $\text{Ob}([\mathcal{B}\mathbf{sc}])$  の上には二項関係

$$\leq := \left\{ ([U], [V]) \in \text{Ob}([\mathcal{B}\mathbf{sc}])^{\times 2} \mid \text{Hom}_{\mathbf{B}\mathbf{sc}}(U, V) \neq \emptyset \right\} \quad (1.2.9)$$

が定まる．定理 1.2 は，特異性タイプが開埋め込みについて半順序集合を成し，さらにそれが **basic** の**深さ**によって特徴付けられることを主張する．

### 定理 1.2: Basics are easy

- (1)  $\forall U = \mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z) \in \text{Ob}(\mathbf{B}\mathbf{sc})$  に対して，Kan 複体の包含

$$\mathcal{O}(\mathbb{R}^n) \times \text{Aut}(Z) \hookrightarrow \text{Hom}_{\mathbf{B}\mathbf{sc}}(U, U)$$

は Kan 複体のホモトピー同値である<sup>a</sup>．

- (2)  $\forall f \in \text{Hom}_{\mathbf{B}\mathbf{sc}}(U, V)$  に対して，以下のいずれかちょうど 1 つが真である：

(a)  $f$  は  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{B}\mathbf{sc}$  における同型射である．

(b)  $\text{depth}(U) < \text{depth}(V)$

- (3) 集合  $\text{Ob}([\mathcal{B}\mathbf{sc}])$  上の二項関係 (1.2.9) は半順序である．半順序集合  $(\text{Ob}([\mathcal{B}\mathbf{sc}]), \leq)$  を  $(1, 1)$ -圏と見做し，それを  $[\mathcal{B}\mathbf{sc}]$  と書く．

- (4)  $(\infty, 1)$ -圏の関手

$$[-]: \mathcal{B}\mathbf{sc} \longrightarrow N([\mathcal{B}\mathbf{sc}])$$

は conservative である． i.e.  $(U \xrightarrow{f} V) \in \mathcal{B}\mathbf{sc}_1$  が  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{B}\mathbf{sc}$  における同型射であるためには， $U, V$  が  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{B}\mathbf{sc}$  において同型であることが必要十分である．

- (5) 写像

$$\text{depth}: \text{Ob}([\mathcal{B}\mathbf{sc}]) \longrightarrow \mathbb{Z}_{\geq -1}$$

は順序を保つ．

<sup>a</sup> 左辺を  $\text{Sing}^{\text{sm}}(\mathcal{O}(n)) \times \text{Aut}(Z)$  としても等価な主張である．

### 証明 (1) 命題 1.2

- (2) 補題 1.8 の (1), (3), (4) の同値性より明らか．  
(3) 反射律と推移律は自明．対称律は補題 1.8 の (3) と (4) の同値性から従う．  
(4) 補題 1.8 より従う．  
(5) 補題 1.8 より従う．

■

### 1.2.10 特異性タイプによる層状化

層状化空間の局所的な特異性は**局所的深さ**によって特徴付けられる．これにより，局所的深さをとるという操作によって常に別の層状化を考えることができる．

集合

$$\mathbb{P} := \{ (k, n) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \mid -1 \leq k \leq n \}$$

の上の半順序  $\leq \subset \mathbb{P} \times \mathbb{P}$  を次のように定義する：

$$(k, n) \leq (k', n') \iff k \geq k' \text{ かつ } n \geq n'$$

#### 補題 1.9: 局所的深さによる層状化

任意の  $C^0$  級層状化空間  $(X \xrightarrow{s} P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}^{C^0})$  に対して、以下の写像は連続になり、位相空間  $X$  の新しい  $\mathbb{P}$ -層状化を与える：

$$\sigma_X: X \longrightarrow \mathbb{P}, x \longmapsto (\text{depth}_x(X), \dim_x(X))$$

さらに、 $(1, 1)$ -圏 **Top** における以下の図式を可換にするような、順序を保つ写像  $\bar{s}: P \longrightarrow \mathbb{P}$  が存在する：

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\sigma_X} & \mathbb{P} \\ s \downarrow & \nearrow \exists \bar{s} & \\ P & & \end{array}$$

**証明**  $\sigma_X$  が連続であるような  $C^0$  級層状化空間  $(X \rightarrow P)$  全体が成す充満部分圏を  $\mathcal{T} \subset \mathbf{Snglr}^{C^0}$  と書く． $\mathcal{T}$  が条件 **(Snglr-1)-(Snglr-5)** を充たすことを示せば十分である<sup>\*15</sup>．

**(Snglr-1)**  $(\emptyset \rightarrow \emptyset) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$  は自明である．

**(Snglr-2)** コンパクトな  $(X \xrightarrow{s} P) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$  を与える．**コーンの定義** から、 $\forall [t, x] \in C(X) \setminus \{\text{pt}\}$  に対して  $\sigma_{C(X)}([t, x]) = (\text{depth}_x(X), \dim_x(X) + 1)$  が成り立つ．故に写像  $\sigma_{C(X)}|_{C(X) \setminus \{\text{pt}\}}: C(X) \setminus \{\text{pt}\} \longrightarrow \mathbb{P}$  は連続写像の合成

$$C(X) \setminus \{\text{pt}\} = \mathbb{R}_{>0} \times X \xrightarrow{\text{proj}_X} X \xrightarrow{\sigma_X} \mathbb{P} \xrightarrow{+(0,1)} \mathbb{P}$$

と等しく、連続である．

ところで、**【例 1.1.8】** から  $\text{pt} \in C(X)$  に対しては  $\sigma_{C(X)}(\text{pt}) = (\dim(X) + 1, \dim(X) + 1)$  が成り立つ．故に  $\mathbb{P}$  において  $\sigma_{C(X)}(\text{pt}) \leq \sigma_{C(X)}(C(X) \setminus \{\text{pt}\})$  が成り立つ．従って勝手な開集合  $Q \subset \mathbb{P}$  に対して、もし  $\sigma_{C(X)}(\text{pt}) \notin Q$  ならば  $\sigma_{C(X)}^{-1}(Q) = (\sigma_{C(X)}|_{C(X) \setminus \{\text{pt}\}})^{-1}(Q)$  が、もし  $\sigma_{C(X)}(\text{pt}) \in Q$  ならば  $\sigma_{C(X)}^{-1}(Q) = \{\text{pt}\} \cup (C(X) \setminus \{\text{pt}\}) = C(X)$  が成り立つので、 $\sigma_{C(X)}^{-1}(Q)$  が開集合であること、i.e.  $\sigma_{C(X)}$  が連続写像であることが示された．

**(Snglr-3)**  $\forall (X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$  を1つ固定する．このとき、**【例 1.1.8】** から  $\forall (x, t) \in X \times \mathbb{R}$  に対して  $\sigma_{X \times \mathbb{R}}(x, t) = (\text{depth}_x(X), \dim_x(X) + 1)$  が成り立つ．i.e. 写像  $\sigma_{X \times \mathbb{R}}: X \times \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{P}$  は連続写像の合成

$$X \times \mathbb{R} \xrightarrow{\text{proj}_X} X \xrightarrow{\sigma_X} \mathbb{P} \xrightarrow{+(0,1)} \mathbb{P}$$

に等しく、連続である．

<sup>\*15</sup> これらの条件を充たす最小の  $(1, 1)$ -圏のことを  $\mathbf{Snglr}^{C^0}$  と定義したため、 $\mathcal{T} \subset \mathbf{Snglr}^{C^0}$  が言えるのである．

(Snglr-4)  $\forall (X \xrightarrow{s} P) \in \text{Ob}(\mathcal{T})$  および  $\text{Hom}_{\text{StTop}}((U \rightarrow P_U), (X \rightarrow P)) \neq \emptyset$  を充たす勝手な  $(U \xrightarrow{u} P_U) \in \text{Ob}(\text{Snglr}^{C^0})$  を固定する. このとき層状化開埋め込み  $(i, \bar{i}) \in \text{Hom}_{\text{StTop}}((U \rightarrow P_U), (X \rightarrow P)) \neq \emptyset$  をとると, 開埋め込みが局所的次元を保存すること<sup>\*16</sup>から  $\sigma_U: U \rightarrow \mathbb{P}$  は連続写像の合成

$$U \xrightarrow{i} X \xrightarrow{s} P \xrightarrow{\bar{s}} \mathbb{P}$$

に等しく, 連続である.

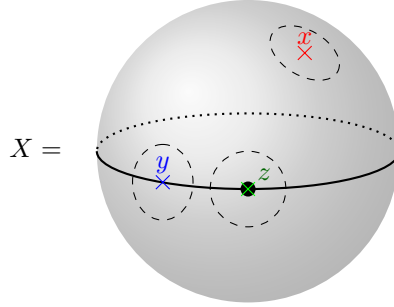
(Snglr-5)  $\mathcal{T}$  内に開被覆  $\{(i_\lambda, \bar{i}_\lambda) \in \text{Hom}_{\text{StTop}}((U_\lambda \xrightarrow{\sigma_\lambda} P_\lambda), (X \xrightarrow{s} P))\}_{\lambda \in \Lambda}$  を持つような  $C^0$  級層状化空間  $(X \xrightarrow{s} P) \in \text{Ob}(\text{Snglr}^{C^0})$  を与える. このとき, 勝手な開集合  $Q \subset \mathbb{P}$  に対して

$$\sigma_X^{-1}(Q) = \bigcup_{\lambda \in \Lambda} i_\lambda(U_\lambda \cap i_\lambda^{-1}(\sigma_X^{-1}(Q)))$$

が成り立つが,  $i_\lambda(U_\lambda \cap i_\lambda^{-1}(\sigma_X^{-1}(Q))) \subset X$  は開なので  $\sigma_X^{-1}(Q)$  は  $X$  の開集合である. i.e.  $\sigma_X$  は連続写像である. ■

補題 1.8 および定理 1.2 より, 補題 1.9 で定義した局所的深さによる層状化  $s_X: X \rightarrow \mathbb{P}$  は,  $X$  の各点における特異性タイプを特徴づける. しかるに, 同じ深さだが異なる特異性タイプを検出することができない. 従って, そもそも値域を  $[\text{Bsc}]^{\text{op}}$  そのものに持つような層状化  $\alpha_X: X \rightarrow [\text{Bsc}]^{\text{op}}$  があれば実用上便利である. 補題 1.10 においてそのような  $\alpha_X$  を構成しよう. 直感的には, 補題 1.10 の構成とは次のようなものである.

いま  $X$  として, 赤道上に局所的深さがそれぞれ 1, 2 であるような層を持つ 2 次元球面を考え, 3 点  $x, y, z \in X$  を下の図のようにとる.



このとき,  $\alpha_X$  が各点に割り当てる特異性タイプが

$$\alpha_X(x) = \left[ \begin{array}{c} \text{0} \\ \times \end{array} \right] = [\mathbb{R}^2],$$

$$\alpha_X(y) = \left[ \begin{array}{c} (0, \text{pt}) \\ \times \end{array} \right] = [\mathbb{R} \times \mathbb{C}(\bullet \amalg \bullet)],$$

<sup>\*16</sup> Snglr<sup>C<sup>0</sup></sup> の定義から Snglr<sup>C<sup>0</sup></sup> の対象はパラコンパクトなので.

$$\alpha_X(z) = \left[ \begin{array}{c} \text{pt} \\ \text{---} \end{array} \right] = \left[ \text{C} \left( \begin{array}{c} \bullet \\ \circlearrowleft \\ \bullet \end{array} \right) \right]$$

となるように  $\alpha_X$  を構成するのである.

#### 補題 1.10: 半順序集合 $[\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$ による層状化

任意の **conically smooth な層状化空間**  $(X \xrightarrow{s} P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr})$  に対して, 以下は well-defined な連続写像になり, 位相空間  $X$  の新しい  **$[\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$ -層状化** を与える:

$$\alpha_X: X \longrightarrow [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}, x \longmapsto \left[ \arg \max_{U \in \mathcal{U}_x} (\text{depth}: \mathcal{U}_x \longrightarrow \mathbb{Z}_{\geq -1}) \right]$$

ただし,  $\forall x \in X$  に対して集合  $\mathcal{U}_x \subset \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$  を以下で定義した.

$$\mathcal{U}_x := \{ U \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc}) \mid \exists \iota \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(U, X), x = \iota(\mathbf{0}) \}$$

さらに,  $\alpha_X: X \longrightarrow [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  は補題 1.9 による層状化  $\sigma_X: X \longrightarrow \mathbb{P}$  を次のように分解する:

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\sigma_X} & \mathbb{P} \\ \alpha_X \downarrow & \nearrow (\text{depth}, \dim) & \\ [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}} & & \end{array}$$

任意の射  $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(X, Y)$  に対して,  $\alpha_X = \alpha_Y \circ f$  が成り立つ.

**証明** 余計な煩雑さを回避するために, 以下の証明において **conically smooth atlas** は常に省略する.

$\forall x \in X$  を 1 つ固定する.  $\forall U \in \mathcal{U}_x$  に対して, **深さの定義** より  $\text{depth}_x(U) = \text{depth}(U) \leq \text{depth}(X \xrightarrow{s} P) < \infty$  が成り立つので,  $U_x := \arg \max_{U \in \mathcal{U}_x} (\text{depth}) \in \mathcal{U}_x$  は存在する. 補題 1.8 より  $\text{depth}_x(U_x) = \text{depth}_x(U'_x)$  ならば  $[U_x] = [U'_x]$  であり, 写像  $\alpha_X$  が well-defined であることが示された.

次に  $\alpha_X$  の連続性を  $\text{depth}(X \rightarrow P)$  に関する数学的帰納法により示す.  $\text{depth}(X \rightarrow P) = -1$  のとき,  $X = \emptyset$  であり自明である.  $\forall (X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr}_{\leq d, \leq \infty})$  についての証明が完了しているとする.

#### basic に関する連続性

まず,  $\forall (U \xrightarrow{s} P) = (\mathbb{R}^n \xrightarrow{0} [0]) \times \text{C} \left( Z \xrightarrow{r} Q \right) \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc}_{d+1, \leq \infty})$  について写像  $\alpha_U: U \longrightarrow [\mathbf{Bsc}]$  が連続であることを示そう.

まず  $\forall x \in \mathbb{R}^n \times \{\text{pt}\} \subset \mathbb{R}^n \times \text{C}(Z) = U$  に対しては  $U \in \mathcal{U}_x$  であり, さらに  $U_{s(x)} = s^{-1}(\{(0, -\infty)\}) = \mathbb{R}^n \times \{\text{pt}\}$  なので

$$\begin{aligned} \text{depth}_x(U \xrightarrow{s} P) &= \dim_x(\mathbb{R}^n \times \text{C}(Z)) - \dim_x(U_{s(x)}) \\ &= n + \dim_{\text{pt}}(\text{C}(Z)) - n \\ &= \text{depth}_{\text{pt}}(\text{C}(Z \rightarrow Q)) \\ &= \text{depth}(U) \end{aligned}$$

が成り立ち,  $\alpha_U(x) = [U]$  と計算できる. 一方で,  $\forall x = (u, (t, z)) \in U \setminus (\mathbb{R}^n \times \{\text{pt}\}) = \mathbb{R}^n \times (\mathbb{R}_{>0} \times Z)$  に

対して  $\alpha_U(x)$  を計算しよう.  $\forall (V \xrightarrow{v} P_V) \in \mathcal{U}_x$  に対して, 層状化開埋め込み  $(\iota, \bar{\iota}) \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(V, U)$  とは  $(1, 1)$ -圏 **Top** の可換図式

$$\begin{array}{ccc} V & \xhookrightarrow{\iota} & U \\ v \downarrow & & \downarrow s \\ P_V & \xrightarrow{\bar{\iota}} & P \end{array}$$

であって,  $\forall p \in P_V$  に対して

$$\iota|_{V_p} : V_p \longrightarrow U_{\bar{\iota}(p)}$$

が位相的開埋め込みになっているものであったことを思い出そう. したがって

$$\iota|_{V_{v(x)}} : V_{v(x)} \longrightarrow U_{\bar{\iota} \circ v(x)} = U_{s(x)}$$

は開埋め込みであり<sup>\*17</sup>,

$$\dim_x(V_{v(x)}) = \dim_x(U_{s(x)})$$

が成り立つ. いま  $s(x) = (0, r(z))$  であるから  $U_{s(x)} = s^{-1}(\{s(x)\}) = \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_{>0} \times Z_{r(z)}$  であり

$$\dim_x(U_{s(x)}) = n + 1 + \dim_z(Z_{r(z)})$$

と計算できる. そのうえ定理 1.2-(2) より  $\dim_x(V) \leq \dim_x(U) = n + \dim_{[t, z]}(\mathbf{C}(Z))$  が言えるので,

$$\begin{aligned} \text{depth}_x(V \xrightarrow{v} P_V) &= \dim_x(V) - \dim_x(V_{v(x)}) \\ &\leq n + \dim_{[t, z]}(\mathbf{C}(Z)) - (n + 1 + \dim_z(Z_{r(z)})) \\ &< \dim_{[t, z]}(\mathbf{C}(Z)) - \dim_z(Z_{r(z)}) \\ &= \text{depth}_x(U) \\ &\leq \text{depth}(U) \end{aligned}$$

が分かった. 故に  $\alpha_U(x) = [V_0]$  なる  $V_0 \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$  は常に  $\text{depth}(V_0) < \text{depth}(U)$  を満たすことが分かった.

ここで, 位相空間  $[\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  の勝手な開集合  $\forall \mathcal{W} \subset [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  をとる. もし  $[U] \in \mathcal{W}$  ならば, 半順序集合  $[\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  の位相の定義から  $\forall [V] \in [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  に対して

$$[U] \leq [V] \iff \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}([V], [U]) \neq \emptyset \implies [V] \in \mathcal{W}$$

が成り立つ<sup>\*18</sup>. 故に補題 1.8 および定理 1.2-(2) より,  $\mathcal{W}$  は  $\text{depth}(V) \leq \text{depth}(U)$  を満たす全ての  $[V] \in [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  を含む. 従って  $\alpha_U^{-1}(\mathcal{W}) = U$  であり,  $\alpha_U^{-1}(\mathcal{W})$  が  $U$  の開集合であることが分かった. 一方でもし  $[U] \notin \mathcal{W}$  であるならば, 半順序集合  $[\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  の位相の定義からある  $[V] \in \mathcal{W}$  が存在して  $[U] \leq [V] \iff \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}([V], [U]) \neq \emptyset$  を満たす. そのような  $[V]$  のうち最小のものを  $[V_0]$  と書くと  $\mathcal{W} = \{[V] \in [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}} \mid [V_0] \leq [V]\}$  であり, かつ定理 1.2-(2) より  $\text{depth}(U) > \text{depth}(V_0)$  でなくてはならない. 故に帰納法の仮定が使えて,  $\alpha_U^{-1}(\mathcal{W}) \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_{>0} \times Z \subset U$  が  $U$  の開集合であることが分かった.

#### 一般の $X \rightarrow P$ に関する連続性

$(X \rightarrow P)$  の, basic による開被覆  $\{i_\lambda \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(U_\lambda, X)\}_{\lambda \in \Lambda}$  をとる<sup>\*19</sup>.  $\forall \lambda \in \Lambda$  に対して,  $i_\lambda$  が

<sup>\*17</sup> 正確には,  $V_{v(x)}$  と書いたときは  $V_{v \circ \iota^{-1}(x)}$  を意味している. 図式の可換性から  $U_{\bar{\iota} \circ v \circ \iota^{-1}(x)} = U_{s(x)}$  が分かる.

<sup>\*18</sup> 半順序 (1.2.9) の op をとっていることに注意!

<sup>\*19</sup> conically smooth atlas が少なくとも 1 つ存在するので, 開被覆は存在する.

層状化開埋め込みなので  $\alpha_{U_\lambda} = \alpha_X \circ i_\lambda: U_\lambda \rightarrow [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  が成り立つことに注意する.

ここで位相空間  $[\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  の勝手な開集合  $\forall \mathcal{W} \subset [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  をとる. すると

$$\begin{aligned}\alpha_X^{-1}(\mathcal{W}) \cap i_\lambda(U_\lambda) &= i_\lambda((\alpha_X \circ i_\lambda)^{-1}(\mathcal{W})) \\ &= i_\lambda((\alpha_{U_\lambda})^{-1}(\mathcal{W}))\end{aligned}$$

と書ける. ところで, basic の場合の証明より  $\alpha_{U_\lambda}: U_\lambda \rightarrow [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  は連続であるから,  $(\alpha_{U_\lambda})^{-1}(\mathcal{W})$  は  $U_\lambda$  の開集合である. そのうえ  $i_\lambda$  が開埋め込みであることから  $\alpha_X^{-1}(\mathcal{W}) \cap i_\lambda(U_\lambda)$  は  $X$  の開集合であり,

$$\alpha_X^{-1}(\mathcal{W}) = \bigcup_{\lambda \in \Lambda} \alpha_X^{-1}(\mathcal{W}) \cap i_\lambda(U_\lambda)$$

が  $X$  の開集合であることが示された.

$\alpha_X$  の定義から,  $\forall x \in X$  に対して

$$\begin{aligned}\sigma_X(x) &= (\text{depth}_x(X), \dim_x(X)) \\ &= (\text{depth}(\alpha_X(x)), \text{depth}(\alpha_X(x)))\end{aligned}$$

が成り立つことは明らかである. ■

### 1.2.11 tangent classifier の局所的構造

#### 定義 1.35: 制限された tangent classifier

$\forall (X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr})$  および basic  $\forall U = \mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z) \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$  を与える. このとき,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathbf{Bsc}_{[U]}$ ,  $\mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}_{[U]}(X)$  および  $(\infty, 1)$ -圏の開手  $(\tau_X)_! \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}_{[U]}(X), \mathbf{Bsc}_{[U]})$  を以下の  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻しによって次のように定義する:

$$\begin{array}{ccc}\mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}_{[U]}(X) & \longrightarrow & \mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}(X) \\ (\tau_X)_! \downarrow & \lrcorner & \downarrow \tau_X \\ \mathbf{Bsc}_{[U]} & \longrightarrow & \mathbf{Bsc} \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow [-] \\ \{[U]\} & \hookrightarrow & \mathbf{N}([\mathbf{Bsc}])\end{array}$$

まず,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathbf{Bsc}_{[U]}$  の構造を詳細に調べよう. 定理 1.2-(4) より  $\mathbf{Bsc} \xrightarrow{[-]} \mathbf{N}([\mathbf{Bsc}])$  はアイソファイブレーションなので, 補題 1.4, 1.5 から  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻し<sup>\*20</sup>

$$\begin{array}{ccc}\mathbf{Bsc}_{[U]} & \longrightarrow & \mathbf{N}_{\text{hc}}(\mathbf{Bsc}) \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow [-] \\ \Delta^0 & \xrightarrow{[U]} & \mathbf{N}([\mathbf{Bsc}])\end{array}$$

<sup>\*20</sup> 混乱防止のため, Kan-豊穠圏  $\mathbf{Bsc}$  およびその homotopy coherent nerve  $\mathbf{N}_{\text{hc}}(\mathbf{Bsc})$  を区別した.



は,  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  の引き戻しとして計算できる. よって

$$(\mathcal{B}\mathbf{sc}_{[U]})_0 = \{ V \in \mathbf{Ob}(\mathbf{Bsc}) \mid V \in [U] \}$$

である. さらに定理??より,  $\mathcal{B}\mathbf{sc}_{[U]}$  の射の空間について Kan 複体のホモトピー同値

$$\mathrm{Map}_{\mathcal{B}\mathbf{sc}_{[U]}}(V, W) \simeq \mathrm{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(V, W) \simeq \mathrm{Map}_{\mathbf{N}_{\mathrm{hc}}(\mathbf{Bsc})}(V, W) \quad (1.2.10)$$

が成り立つ. 故に補題 1.8 および定理 1.2 から, 群的な Kan 複体のホモトピー同値

$$\mathbf{B} \mathrm{Aut}(U) \xrightarrow{\simeq} \mathcal{B}\mathbf{sc}_{[U]} \quad (1.2.11)$$

が存在することがわかる. ただし, 群的な Kan 複体  $\mathbf{Aut}(U)$  の **delooping** と呼ばれる Kan 複体  $\mathbf{B} \mathrm{Aut}(U)$  を次のように定義した<sup>\*21</sup>:

$$\mathbf{B} \mathrm{Aut}(U) := \mathbf{N}_{\mathrm{hc}} \left( \begin{array}{c} \mathrm{Aut}(U) \\ \curvearrowright \\ * \end{array} \right)$$

次に,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}_{[U]}(X)$  の構造を詳細に調べる. [?, Tag 018F] より  $\tau_X$  が**右ファイブレーション** (したがって図 1.1 より**アイソファイブレーション**) なので, 補題 1.4, 1.5 から  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻し

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}_{[U]}(X) & \longrightarrow & \mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}(X) \\ (\tau_X)_! \downarrow & \lrcorner & \downarrow \tau_X \\ \mathcal{B}\mathbf{sc}_{[U]} & \longrightarrow & \mathbf{N}_{\mathrm{hc}}(\mathbf{Bsc}) \end{array}$$

は  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  の引き戻しとして計算できる. 故に【例 1.2.3】および定義??から,  $\mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}_{[U]}(X)$  の  $n$ -単体は

$$\begin{aligned} \mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}_{[U]}(X)_n &\cong (\mathcal{B}\mathbf{sc}_{[U]/X})_n \\ &\cong \left\{ H \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^{n+1}, \mathbf{N}_{\mathrm{hc}}(\mathbf{Snglr})) \mid \begin{array}{l} H_{[0]}(\{n+1\})=X, \\ H_{[0]}(\{i\}) \in [U] \ (0 \leq i \leq n) \end{array} \right\} \\ &= \left\{ H \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{Cat}_{\Delta}}(\mathfrak{C}[n+1], \mathbf{Snglr}) \mid \begin{array}{l} H_0(n+1)=X, \\ H_0(i) \in [U] \ (0 \leq i \leq n) \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (1.2.12)$$

であり,  $X$  を除く頂点に**特異性タイプ**  $[U]$  の **basic** が載る形になる. 例えば 0-単体は

$$\mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}_{[U]}(X)_0 = \bigcup_{V \in [U]} \mathrm{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(V, X)$$

である. 1-単体は【例??】より

$$\mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}_{[U]}(X)_1 \cong \left\{ \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{f} & W \\ \downarrow \iota_V & \swarrow H & \downarrow \iota_W \\ & X & \end{array} \end{array} \mid \begin{array}{l} V, W \in [U], \\ \iota_V \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(V, X), \\ \iota_W \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(W, X), \\ f \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(V, W)_0, \\ H \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(V, X)_1, \\ H|_{\{(1,0)\} \times V = \iota_W \circ f}, H|_{\{(0,1)\} \times V = \iota_V} \end{array} \right\}$$

であることがわかる. i.e.  $\mathcal{E}\mathbf{nt}\mathbf{r}_{[U]}(X)$  の 1-射とは, 以下のデータの組である:

<sup>\*21</sup> より正確には, 対象が 1 点で Hom 対象が  $\mathrm{Aut}(U) \in \mathbf{Ob}(\mathbf{Kan})$  であるような **Kan-豊穠圏**に homotopy coherent nerve を適用して得られる  $(\infty, 1)$ -圏 (特に, この場合は群的な Kan 複体) のことである. この構成は, 群の delooping groupoid の構成を素朴に一般化したものと見做せる.

- 特異性タイプが  $[U]$  の **basic**  $V, W \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$
- 3つの層状化開埋め込み  $\iota_V \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(V, X)$ ,  $\iota_W \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(W, X)$ ,  $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(V, W)$
- $\iota_W \circ f$  と  $\iota_V$  を繋ぐアイソトピー<sup>\*22</sup>  $H \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(\Delta_e^1 \times V, \Delta_e^1 \times X)$

以上の考察から,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathbf{Entr}_{[U]}(X)$  とは直観的には,

- $(X \rightarrow P)$  上に与えられた **conically smooth アトラス**  $\text{Sm}(X \rightarrow P)$  に属するチャート  $(V, V \xrightarrow{\iota_V} X) \in \text{Sm}(X \rightarrow P)$  のうち, 特異性タイプが  $[U]$  であるものを対象に持つ.
- **特異性タイプ**が  $[U]$  であるチャート  $V \xrightarrow{\iota_V} X$  の間のアイソトピーを 1-射に持つ.
- アイソトピーの間のアイソトピーを 2-射に持つ.
- ...

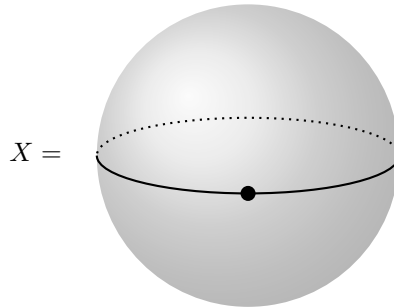
ような  $(\infty, 1)$ -圏であることが分かった.

#### 定義 1.36: $[U]$ -層

$\forall (X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr})$  および **basic**  $\forall U = \mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z) \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$  を与える. このとき位相空間  $X_{[U]} \in \text{Ob}(\mathbf{Top})$  を,  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Top}$  における引き戻しによって次のように定義する:

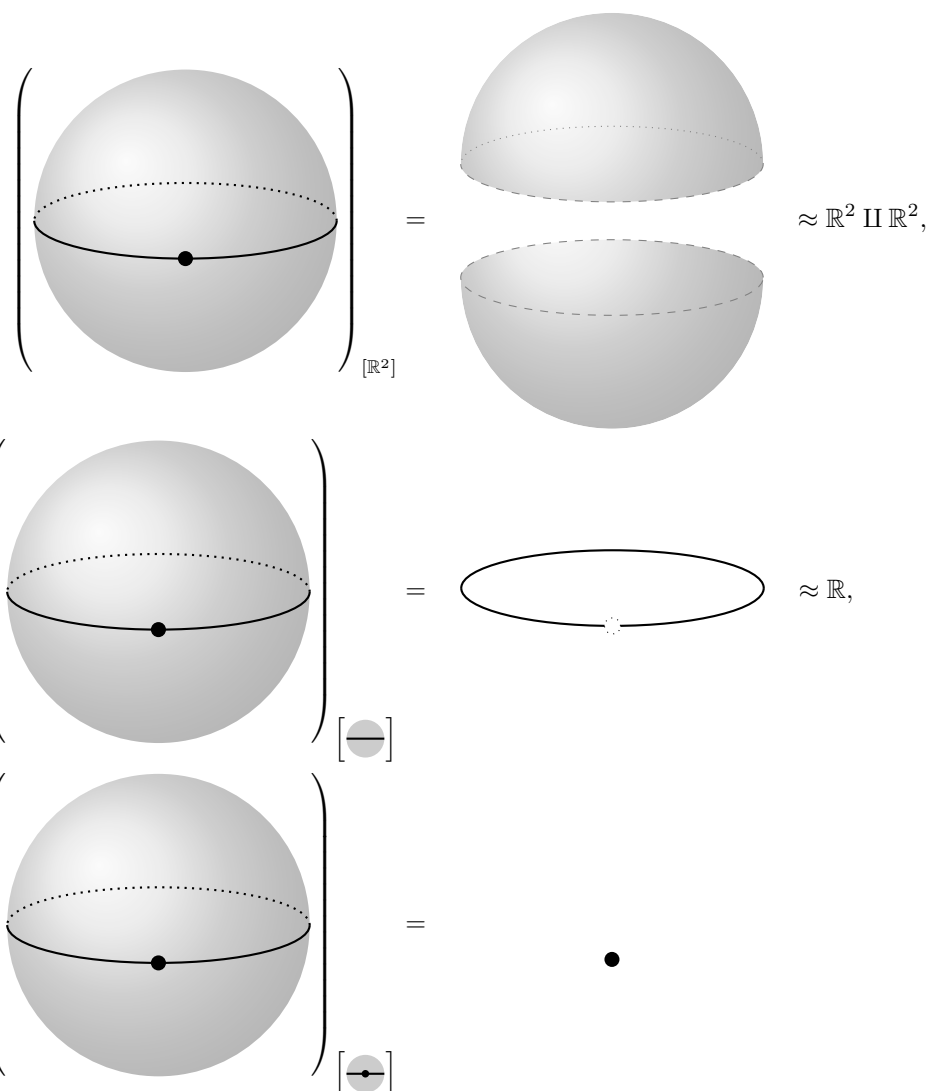
$$\begin{array}{ccc} X_{[U]} & \longrightarrow & X \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow \alpha_X \\ \{[U]\} & \hookrightarrow & [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}} \end{array}$$

つまり,  $X_{[U]}$  とは補題 1.10 で構成した  $[\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$ -層状化  $(X \xrightarrow{\alpha_X} [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}})$  の, 特異性タイプ  $[U] \in [\mathbf{Bsc}]^{\text{op}}$  上のファイバーである. 例えば



<sup>\*22</sup> より正確には,  $\text{proj}_X \circ H \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(\Delta_e^1 \times V, X)$  がアイソトピーである.

の場合、空でない  $X_{[U]}$  は



の3つである。  $X_{[U]}$  自身は  $C^\infty$  多様体であることに注意しよう。

#### 補題 1.11: $X_{[U]}$ は $C^\infty$ 多様体

層状化空間  $(X_{[U]} \rightarrow \{[U]\}) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr})$  は  $\dim(U) - \text{depth}(U)$  次元の  $C^\infty$  多様体である。

証明 [?, Corollary 3.4.5] ■

ここで、 $\mathcal{Bsc}_{[U]}$  の部分  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{Bsc}_{[U]}^0$  を、対象は全く同一だが、射の空間を原点を保つ層状化開埋め込みに制限したものとして定義する。すると  $\forall V, W \in (\mathcal{Bsc}_{[U]}^0)_0 = (\mathcal{Bsc}_{[U]})_0$  に対して、定理 1.2 および (1.2.10) より Kan 複体のホモトピー同値

$$\text{Map}_{\mathcal{Bsc}_{[U]}^0}(V, W) = \text{Hom}_{\mathcal{Bsc}}^0(V, W) \simeq \text{Hom}_{\mathcal{Bsc}}(V, W) = \text{Map}_{\mathcal{Bsc}_{[U]}}(V, W)$$

が成り立つから,  $(\infty, 1)$ -圏同値

$$\mathcal{Bsc}_{[U]}^0 \xrightarrow{\cong} \mathcal{Bsc}_{[U]} \quad (1.2.13)$$

が成り立つ<sup>\*23</sup>.

さらに,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{Entr}_{[U]}^0(X)$  を  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻し<sup>\*24</sup>

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{Entr}_{[U]}^0(X) & \longrightarrow & \mathcal{Entr}_{[U]}(X) \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow (\tau_X)_! \\ \mathcal{Bsc}_{[U]}^0 & \xrightarrow{\simeq} & \mathcal{Bsc}_{[U]} \end{array}$$

により定義する. 引き戻しは  $(\infty, 1)$ -圏同値を保存するので,  $\mathcal{Entr}_{[U]}^0(X) \simeq \mathcal{Entr}_{[U]}(X)$  が成り立つ. (1.2.12) より,  $\mathcal{Entr}_{[U]}^0(X)$  の  $n$ -射は

$$\begin{aligned} \mathcal{Entr}_{[U]}^0(X)_n &\cong (\mathcal{Bsc}_{[U]/X}^0)_n \\ &\cong \left\{ H \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^{n+1}, \mathbf{N}_{\text{hc}}(\mathbf{Snglr})) \left| \begin{array}{l} H_{[0]}(\{n+1\}) = X, \\ H_{[0]}(\{i\}) \in [U] \ (0 \leq i \leq n), \\ H|_{\Delta^{n+1} \setminus \{n+1\}} \text{ preserves } \mathbf{0} \end{array} \right. \right\} \\ &= \left\{ H \in \text{Hom}_{\mathbf{Cat}_{\Delta}}(\mathfrak{C}[n+1], \mathbf{Snglr}) \left| \begin{array}{l} H_0(n+1) = X, \\ H_0(i) \in [U] \ (0 \leq i \leq n), \\ H_{i,j}(\mathbf{N}(P_{ij})) \subset \text{Hom}_{\mathcal{Bsc}^0}(H_0(i), H_0(j)) \ (0 \leq i \leq j \leq n) \end{array} \right. \right\} \end{aligned}$$

となっている.

ここで,  $(\infty, 1)$ -圏の関手

$$\text{ev}_0: \mathcal{Entr}_{[U]}^0(X) \longrightarrow \text{Sing}^{\text{sm}}(X)$$

を,  $\forall n \geq 0$  に対して

$$\begin{aligned} \text{ev}_{\mathbf{0}[n]}: \mathcal{Entr}_{[U]}^0(X)_n &\longrightarrow \text{Sing}^{\text{sm}}(X) = \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(\Delta_e^n, X), \\ H &\longmapsto (x \mapsto \text{proj}_X \circ H_{[n+1]}(\text{Id}_{[n+1]})(x, \mathbf{0})) \end{aligned}$$

と定義する.  $H_{[n+1]}(\text{Id}_{[n+1]}) \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(H_{[0]}(\{0\}), X)_n \subset \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(\Delta_e^n \times H_{[0]}(\{0\}), \Delta_e^n \times X)$  であることに注意する. いま  $H_{[0]}(\{0\}) \in [U]$  であるから,  $\forall x \in \Delta_e^n$  に対して

$$\text{proj}_X \circ H_{[n+1]}(\text{Id}_{[n+1]})(x, -) \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(H_{[0]}(\{0\}), X)$$

である. よって  $\alpha_X$  の構成より,  $\text{proj}_X \circ H_{[n+1]}(\text{Id}_{[n+1]})(x, \mathbf{0}) \in X_{[U]}$  が言える. i.e.  $(\infty, 1)$ -圏の関手  $\text{ev}_0$  は  $\text{Sing}^{\text{sm}}(X_{[U]})$  に値をとる.

<sup>\*23</sup> 包含写像  $\mathcal{Bsc}_{[U]}^0 \hookrightarrow \mathcal{Bsc}_{[U]}$  に命題??を適用した.

<sup>\*24</sup> 右ファイブレーションは引き戻しについて安定なので  $(\tau_X)_!$  もまた右ファイブレーションである. よって補題 1.4, 1.5 から, この  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻しは実際には  $\mathbf{sSet}$  の引き戻しとして計算できる.

**定理 1.3: tangent classifier の局所的な構造**

$\forall (X \rightarrow P) \in \text{Ob}(\mathbf{Snglr})$  および **basic**  $\forall U = \mathbb{R}^n \times C(Z) \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$  を与える. このとき,

$$\left( \mathcal{E}\text{nt}_{[U]}(X) \xrightarrow{(\tau_X)_!} \mathcal{Bsc}_{[U]} \longrightarrow \mathcal{Bsc}_{[\mathbb{R}^n]} \right) \simeq \left( \text{Sing}(X_{[U]}) \xrightarrow{\tau_{X_{[U]}}} \mathbf{BO}(n) \right)$$

が成り立つ. ただし, 左辺では命題 1.2 を用いて得られる Kan 複体の<sup>a</sup>ホモトピー同値  $\mathcal{Bsc}_{[U]} \simeq \mathbf{BAut}(U) \simeq \mathbf{BO}(U)$  から誘導される Kan 複体の射  $\mathcal{Bsc}_{[U]} \longrightarrow \mathbf{BO}(\mathbb{R}^n)$  を用いた.

<sup>a</sup> もしくは **Kan-豊稜圏**の

**証明** (1.2.11), (1.2.13) より, Kan 複体のホモトピー同値

$$\mathbf{BAut}(U) \xrightarrow{\simeq} \mathcal{Bsc}_{[U]}^0 \xrightarrow{\simeq} \mathcal{Bsc}_{[U]}$$

がある. 故に,  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻しの図式

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Sing}^{\text{sm}}(X_{[U]}) & \xleftarrow{\text{ev}_0} & \mathcal{E}\text{nt}_{[U]}^{\text{bdl}}(X) & \xleftarrow{i_2} & \mathcal{E}\text{nt}_{[U]}^0(X) & \xleftarrow{i_1} & \mathcal{E}\text{nt}_{[U]}(X) & \longrightarrow & \mathcal{E}\text{nt}(X) \\ & & \downarrow & \lrcorner & \downarrow & \lrcorner & \downarrow (\tau_X)_! & \lrcorner & \downarrow \tau_X \\ & & \mathbf{BAut}(U) & \xrightarrow{\simeq} & \mathcal{Bsc}_{[U]}^0 & \xrightarrow{\simeq} & \mathcal{Bsc}_{[U]} & \longrightarrow & \mathcal{Bsc} \\ & & & & & & \downarrow & & \\ & & & & & & \mathcal{Bsc}_{[\mathbb{R}^{\dim(U) - \text{depth}(U)}]} & & \end{array}$$

を書くことができる<sup>\*25</sup>. 引き戻しは  $(\infty, 1)$ -圏同値を保存するので,  $i_1, i_2$  はどちらも  $(\infty, 1)$ -圏同値である. よって,  $\text{ev}_0$  が Kan 複体のホモトピー同値であることを示せば十分である. そのためには,  $\forall x \in X_{[U]} = \text{Sing}^{\text{sm}}(X_{[U]})_0$  に対して,  $\text{ev}_0$  の  $x$  上のファイバー

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{E}\text{nt}_{[U]}^{\text{bdl}}(X)_x & \longrightarrow & \mathcal{E}\text{nt}_{[U]}^{\text{bdl}}(X) \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow \text{ev}_0 \\ \{x\} & \longrightarrow & \text{Sing}^{\text{sm}}(X_{[U]}) \end{array}$$

が可縮 (i.e.  $\Delta^0$  に Kan 複体のホモトピー同値) であることを示せば十分である [?, Tag 00X1]. ところで, もし勝手な有限<sup>\*26</sup>  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{K}$  および勝手な  $(\infty, 1)$ -圏の関手  $F: \mathcal{K} \longrightarrow \mathcal{E}\text{nt}_{[U]}^{\text{bdl}}(X)_x$  に対して以下の持ち上げ性質が成り立つならば  $\mathcal{E}\text{nt}_{[U]}^{\text{bdl}}(X)_x$  が可縮<sup>\*27</sup>になることが知られている [?, Fact 9.3.9.] :

$$\begin{array}{ccc} \forall \mathcal{K} & \xrightarrow{\forall F} & \mathcal{E}\text{nt}_{[U]}^{\text{bdl}}(X)_x \\ \downarrow & \nearrow \exists \bar{F} & \\ \mathcal{K}^{\triangleleft} & & \end{array}$$

故に, 以下ではこの持ち上げ性質を示そう. ■

<sup>\*25</sup>  $\tau_X$  が**右ファイブレーション**なので, 同じ行の縦の矢印は全て**右ファイブレーション**である.

<sup>\*26</sup> 非退化な単体が高々有限個

<sup>\*27</sup> 正確には**弱可縮** (weakly contractible) だが, 命題??より Kan 複体の場合は両者の概念は一致する.

### 1.2.12 接構造の具体例

#### 定義 1.37: 篩

**Kan**-豊穡圏  $\mathcal{C}$  を与える. このとき充満部分豊穡圏  $\mathcal{L} \subset \mathcal{C}$  が**篩** (sieve) であるとは,  $\forall x \in \text{Ob}(\mathcal{C}), \forall l \in \text{Ob}(\mathcal{L})$  に対して

$$\text{Hom}_{\mathcal{C}}(x, l) \neq \emptyset \implies x \in \text{Ob}(\mathcal{L})$$

が成り立つことをいう.

$(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}$  を与える. このとき**充満部分  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{L} \subset \mathcal{C}$  が篩** (sieve) であるとは, 包含写像が**右ファイブレーション**であることを言う.

もしくは同じ事だが,  $\forall x \in \mathcal{C}_0, \forall l \in \mathcal{L}_0$  に対して

$$\text{Map}_{\mathcal{C}}(x, l) \neq \emptyset \implies x \in \mathcal{L}_0$$

が成り立つことを言う.

## 1.3 隅付き層状化空間

$I$  を有限集合とし,  $2^I$  を  $I$  の部分集合全体が成す集合とする.  $2^I$  は,

$$S \leq T \stackrel{\text{def}}{\iff} S \subset T$$

により半順序集合になる.  $\forall S \in 2^I$  に対して, 集合の包含  $2^S \subset 2^I$  がある.

また, 有限集合  $I$  を添字集合に持つ  $X$  の直積を  $X^I$  のように書く<sup>\*28</sup>

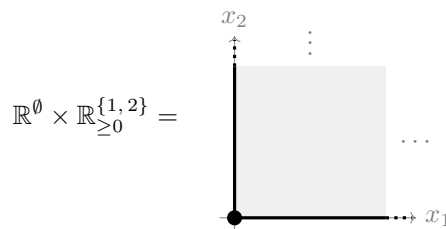
#### 【例 1.3.1】

$I$  を有限集合とし, 勝手な  $T \in 2^I$  を 1 つ固定する. このとき, 位相空間  $\mathbb{R}^{I \setminus T} \times \mathbb{R}_{\geq 0}^T$  は, 連続写像

$$\begin{aligned} c_T^I: \mathbb{R}^{I \setminus T} \times \mathbb{R}_{\geq 0}^T &\longrightarrow 2^T, \\ (x, y) &\longmapsto y^{-1}(\{0\}) \end{aligned} \tag{1.3.1}$$

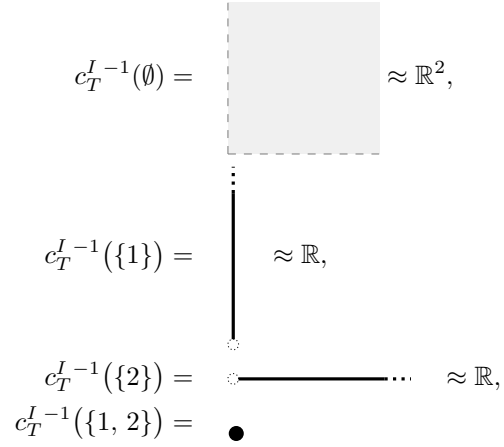
によって conically smooth な層状化空間になる.

例えば  $I = \{1, 2\}, T = \{1, 2\}$  のとき, この層状化空間は



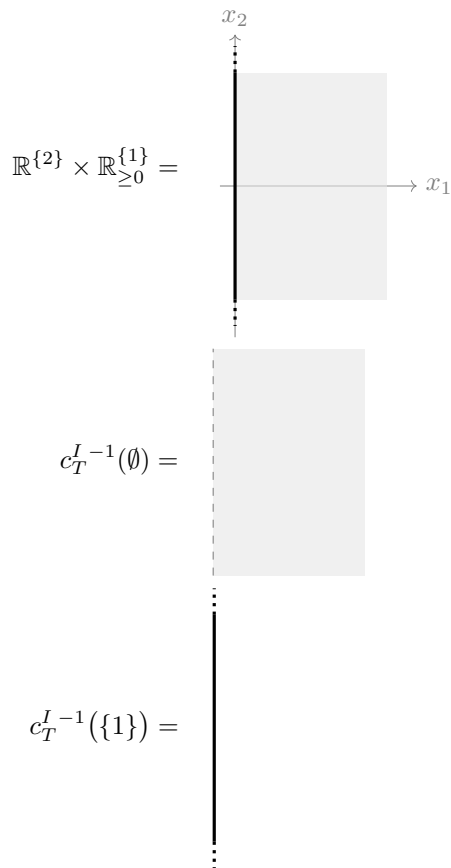
<sup>\*28</sup>  $x \in X^I$  とは, 写像  $x: I \longrightarrow X$  のことである.  $x$  による  $i \in I$  の行き先を  $x_i := x(i) \in X$  と書くことが多い.

のように図示できる．ただし，(1.3.1) による strata を全て書き出すと



のようになっている．

他にも， $I = \{1, 2\}$ ， $T = \{1\}$  のときは



である．

### 定義 1.38: Topologically coCartesian

$I$  を有限集合,  $(X \xrightarrow{s} P)$  を **conically smooth な層状化空間** とする.

連続写像  $X \xrightarrow{c} 2^I$  が**位相的に coCartesian** (topologically coCartesian) であるとは, 以下の条件を充たすことを言う:

#### (TcoCart-1)

ある順序を保つ写像  $P \xrightarrow{\tilde{c}} 2^I$  が一意的に<sup>a</sup>存在して  $(1, 1)$ -圏 **Top** における以下の図式を可換にする:

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{c} & 2^I \\ s \downarrow & \nearrow \exists! \tilde{c} & \\ P & & \end{array}$$

#### (TcoCart-2)

$\forall T \in 2^I$  に対して,  $c$  による strata  $X_T := c^{-1}(\{T\})$  の埋め込み  $X_T \hookrightarrow X$  が, **conically smooth な層状化開埋め込み**

$$\mathbb{R}_{\geq 0}^T \times X_T \hookrightarrow X$$

に拡張する.

<sup>a</sup> (2026/1/21) [?, Remark 2.1.18] が正しくないため, この条件が必要である.

位相的に coCartesian な射は, 層状化空間の隅を指定する. 特に, 条件 **(TcoCart-2)** は, 直観的には隅の開近傍を埋める働きをする.

### 【例 1.3.2】

【例 1.3.1】で定義した連続写像  $\mathbb{R}^{I \setminus T} \times \mathbb{R}_{\geq 0}^T \xrightarrow{c_T} 2^I$  は, 有限集合  $T$  について**位相的に coCartesian** である.

条件 **(TcoCart-2)** を確認しよう.  $0 \leq m \leq n$  とし,  $I = \{1, \dots, n\}$ ,  $T = \{1, \dots, m\} \subset I$  においても一般性を失わない. 勝手な  $S = \{i_1 < \dots < i_k\} \in 2^T$  を 1 つ固定する. このとき

$$\begin{aligned} c_T^{I \setminus T}(\{S\}) &= \{(x, y) \in \mathbb{R}^{I \setminus T} \times \mathbb{R}_{\geq 0}^T \mid y|_S = \{0\}\} \\ &= \{(x_{m+1}, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m) \in \mathbb{R}^{I \setminus T} \times \mathbb{R}_{\geq 0}^T \mid y_{i_1} = \dots = y_{i_k} = 0\} \\ &\approx \mathbb{R}^{I \setminus T} \times \mathbb{R}_{\geq 0}^{T \setminus S} \end{aligned}$$

であるから, 埋め込み

$$\begin{aligned} c_T^{I \setminus T}(\{S\}) &\hookrightarrow \mathbb{R}^{I \setminus T} \times \mathbb{R}_{\geq 0}^T \\ (x, y) &\hookrightarrow (x, y) \end{aligned}$$

は層状化開埋め込み

$$c_T^{I \setminus T}(\{S\}) \times \mathbb{R}_{\geq 0}^S \approx \mathbb{R}^{I \setminus T} \times \mathbb{R}_{\geq 0}^{T \setminus S} \times \mathbb{R}_{\geq 0}^S \hookrightarrow \mathbb{R}^{I \setminus T} \times \mathbb{R}_{\geq 0}^T,$$

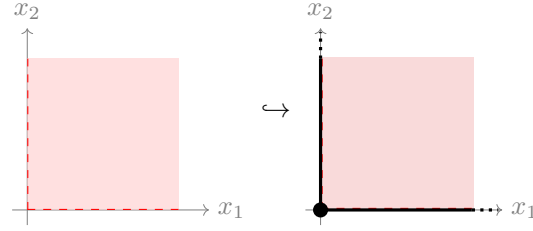


$$(x, y, z) \mapsto (x, (i \mapsto \hat{y}(i)))$$

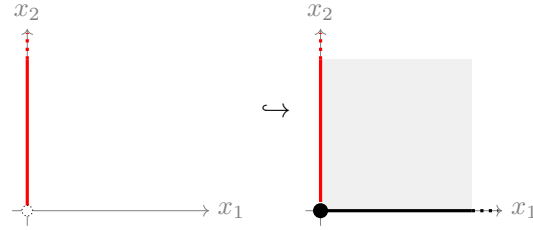
$$\text{w/ } \hat{y}(i) := \begin{cases} z(i), & i \in S, \\ y(i), & i \in T \setminus S \end{cases}$$

に拡張する<sup>a</sup>.

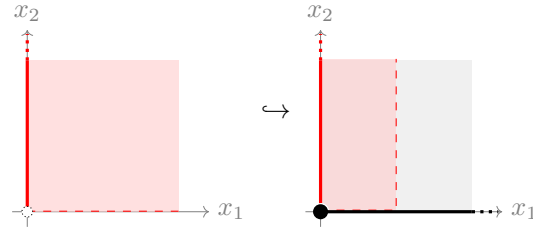
例えば  $I = \{1, 2\}$ ,  $T = \{1, 2\}$  のとき,  $S \in 2^T$  として  $\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{1, 2\}$  が取れる.  $S = \emptyset$  について, 条件 **(TcoCart-2)** は, strata の包含



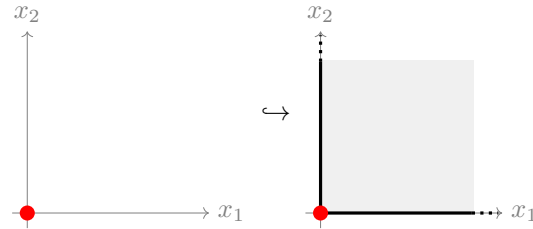
が conically smooth な層状化開埋め込みであることを主張する.  $S = \{1\}$  については, 条件 **(TcoCart-2)** は, strata の包含



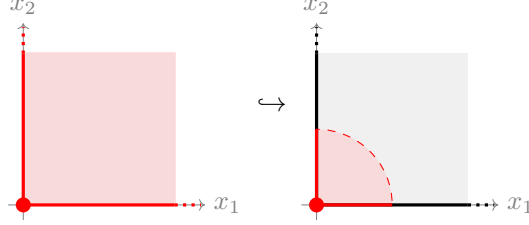
が conically smooth な層状化開埋め込み



に拡張することを主張する. ただし今回の場合, strata の埋め込みの拡張は  $x_1$  方向に無限に伸びても良いが, 埋め込みであることをわかりやすくするために敢えて中途半端なところで区切った.  $S = \{2\}$  の場合も同様の絵が描ける.  $S = \{1, 2\}$  の場合, 条件 **(TcoCart-2)** は, strata の包含



が conically smooth な層状化開埋め込み



に拡張することを主張する.

一般の層状化空間  $X$  の場合もこのように, **(TcoCart-2)** は角に関連する strata の開近傍が存在することを保証してくれる.

---

<sup>a</sup> 0 の座標を  $z \in \mathbb{R}_{\geq 0}^S$  で置き換えたということである.

$I$  を有限集合とする. **Kan-豊穡圏**  $\mathbf{Bsc}^{(I)}$  を次のように構成する:

- **baisc**  $(U \xrightarrow{s_U} P_U) \in \text{Ob}(\mathbf{Bsc})$  および  $I$  について **位相的に coCartesian** な連続写像  $c_U: U \rightarrow 2^I$  の 2 つ組  $((U \xrightarrow{s_U} P_U), c_U)$  を対象とする.
- 対象  $((U \xrightarrow{s_U} P_U), c_U), ((V \xrightarrow{s_V} P_V), c_V)$  の間の Hom-Kan 複体  $\text{Hom}_{\mathbf{Bsc}^{(I)}}((U, c_U), (V, c_V)) \in \text{Ob}(\mathbf{Kan})$  を,  $(1, 1)$ -圏 **Kan** における引き戻しとして次のように定義する:

$$\begin{array}{ccc} \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}^{(I)}}((U, c_U), (V, c_V)) & \longrightarrow & \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, V) \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow \\ \text{Map}_{\mathbf{N}(\mathbf{Poset})/2^I}((P_U \xrightarrow{\bar{c}_U} 2^I), (P_V \xrightarrow{\bar{c}_V} 2^I)) & \longrightarrow & \text{Map}_{\mathbf{N}(\mathbf{Poset})}(P_U, P_V) \end{array}$$

ただし, 条件 **(TcoCart-1)** を用いて, 順序を保つ写像  $P_U \xrightarrow{\bar{c}_U} 2^I, P_V \xrightarrow{\bar{c}_V} 2^I$  を

$$\begin{aligned} (U \xrightarrow{c_U} 2^I) &= (U \xrightarrow{s_U} P_U \xrightarrow{\bar{c}_U} 2^I), \\ (V \xrightarrow{c_V} 2^I) &= (V \xrightarrow{s_V} P_V \xrightarrow{\bar{c}_V} 2^I) \end{aligned}$$

が成り立つように取った.

Kan 複体  $\text{Hom}_{\mathbf{Bsc}^{(I)}}((U, c_U), (V, c_V))$  の  $n$ -射の集合を具体的に書くと<sup>\*29</sup>,

$$\text{Hom}_{\mathbf{Bsc}^{(I)}}((U, c_U), (V, c_V))_n = \{ (f, \tilde{f}) \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(\Delta_e^n \times U, \Delta_e^n \times V) \mid \bar{c}_U = \bar{c}_V \circ \tilde{f} \}$$

のようになる. 引き戻しの図式において, 上の行における Kan 複体の射  $\text{Hom}_{\mathbf{Bsc}^{(I)}}((U, c_U), (V, c_V)) \rightarrow \text{Hom}_{\mathbf{Bsc}}(U, V)$  は inclusion of components である. 故に忘却関手  $\mathbf{N}_{\text{hc}}(\mathbf{Bsc}^{(I)}) \rightarrow \mathbf{N}_{\text{hc}}(\mathbf{Bsc})$  は **右ファイブレーション**であり,  **$\mathbf{Bsc}^{(I)}$ -多様体**を考えることができる.

---

<sup>\*29</sup> 拡張された  $n$ -単体  $\Delta_e^n$  は  $C^\infty$  多様体であり, 非自明な strata を持たない. 故に, 層状化写像  $(f, \tilde{f}) \in \text{Hom}_{\mathbf{Snglr}}(\Delta_e^n \times U, \Delta_e^n \times V)$  について  $\tilde{f}: P_U \rightarrow P_V$  と見做せる.

**定義 1.39:  $\mathbf{Snglr}^{(I)}$**

$\mathbf{N}_{\text{hc}}(\mathbf{Bsc}^{(I)})$ -多様体が成す  $(\infty, 1)$ -圏を

$$\mathbf{Snglr}^{(I)} := \mathcal{M}\mathbf{fld} \left( \mathbf{N}_{\text{hc}} \mathbf{Bsc}^{(I)} \right)$$

とおき,  $\langle I \rangle$ -角を持つ **conically smooth** な層状化空間 (conically smooth stratified spaces with  $\langle I \rangle$ -corners) が成す  $(\infty, 1)$ -圏と呼ぶ.

$\langle I \rangle$ -角を持つ conically smooth な層状化空間  $(U, c_U) \in (\mathbf{Snglr}^{(I)})_0$  が与えられたとき, その内部 (interior) を  $\text{Int}(U, c_U) := c_U^{-1}(\emptyset)$  で定義する.  $\text{Int}(U, c_U)$  は通常の **conically smooth** な層状化空間であり, かつ半順序集合の位相の定義から  $\{\emptyset\} \subset 2^I$  は開集合であるから, この対応は  $(\infty, 1)$ -圏の関手

$$\text{Int}: \mathbf{Snglr}^{(I)} \longrightarrow \mathbf{Snglr}$$

を定める.

**定義 1.40:  $\langle I \rangle$ -角付き  $\mathcal{B}$ -多様体**

$\mathcal{B} \xrightarrow{f} \mathbf{Bsc}$  を  $(\mathcal{B}, f)$ -構造とする.  $\langle I \rangle$ -角付き  $\mathcal{B}$ -多様体 ( $\mathcal{B}$ -manifold with  $\langle I \rangle$ -corners) が成す  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{M}\mathbf{fld}^{(I)}(\mathcal{B})$  を,  $(\infty, 1)$ -圏の引き戻しによって以下の通りに定義する:

$$\begin{array}{ccccc} \mathcal{M}\mathbf{fld}^{(I)}(\mathcal{B}) & \longrightarrow & \mathcal{M}\mathbf{fld}(\mathcal{B}) & \longrightarrow & (\mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathbf{Bsc}})_/f \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow & \lrcorner & \downarrow \text{forget} \\ \mathbf{Snglr}^{(I)} & \xrightarrow{\text{Int}} & \mathbf{Snglr} & \xrightarrow{\tau} & \mathcal{R}\mathbf{fib}_{\mathbf{Bsc}} \end{array}$$

**【例 1.3.3】 Basic with corners**

$I$  を有限集合とし,  $T \in 2^I$  を 1 つ固定する.  $X$  を conically smooth な層状化空間とする. 【例 1.3.2】の考察より, 連続写像

$$c_{T;X}^I: (\mathbb{R}_{\geq 0})^T \times X \xrightarrow{\text{proj}_{(\mathbb{R}_{\geq 0})^T}} (\mathbb{R}_{\geq 0})^T \xrightarrow{c_T^T} 2^T \hookrightarrow 2^I$$

は位相的に **coCartesian** である. 故に 2 つ組  $((\mathbb{R}_{\geq 0})^T \times X, c_{T;X}^I)$  は  $\langle I \rangle$ -角を持つ **conically smooth** な層状化空間である.

**命題 1.3:**

$I$  を有限集合とし, 勝手な  $\langle I \rangle$ -角を持つ **conically smooth** な層状化空間  $(X, c) \in (\mathbf{Snglr}^{(I)})_0$  を与える. このとき, 族

$$\left\{ \varphi((\mathbb{R}_{\geq 0})^T \times U) \subset X \mid T \in 2^I, U \in \mathbf{Bsc}_0, \varphi \in \text{Map}_{\mathbf{Snglr}^{(I)}} \left( ((\mathbb{R}_{\geq 0})^T \times U, c_{T;U}^I), (X, c) \right) \right\}$$

は  $X$  の位相の開基を与える.

**証明** [?, Proposition 7.2.11] ■

命題 1.3 より,  $\langle I \rangle$ -角を持つ層状化空間の conically smooth チャートは, ある  $T \in 2^I$  を用いて

$$(\mathbb{R}_{\geq 0})^T \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z) \quad (1.3.2)$$

の形で書ける層状化空間を定義域とする開埋め込みによって構成されていることが分かった. この意味で, (1.3.2) のことを**角付き basic** と呼ぶことにする.

!  $I$  を  $n \geq 1$  点集合とし,  $0 \leq k \leq n$  に対して  $k$  点部分集合  $T \in 2^I$  をとる. 幾何学的  $k$ -単体  $\Delta_{\text{top}}^k$  を【例 1.1.3】の方法で conically smooth な層状化空間と見做す. このとき, 角付き basic  $\mathbb{R}^{I \setminus T} \times (\mathbb{R}_{\geq 0})^T$  は basic  $\mathbb{R}^{n-k} \times \mathbb{C}(\Delta_{\text{top}}^{k-1})$  と同相である. ところが, 前者の場合は対称群  $\mathfrak{S}_k$  の  $(\mathbb{R}_{\geq 0})^T$  への作用が  $\text{Snglr}^{(I)}$  の射に持ち上がらない一方で, 後者の場合は  $\langle I \rangle$ -角の構造は持たない代わりに  $\mathfrak{S}_k$  の  $\mathbb{C}(\Delta_{\text{top}}^{k-1})$  への作用が  $\text{Snglr}$  の射に持ち上がる.

この違いに由来して, 後者の basic を**置換可能な角** (permutable corner) と呼び, 角付き basic と区別する [?, Remark 7.2.10.].

さて, 任意の有限集合  $I$  および  $T \in 2^I$  に対して全単射

$$\begin{aligned} (2^I)_{\leq T} &\longrightarrow 2^{I \setminus T}, \\ S &\longmapsto S \setminus T \end{aligned}$$

がある. 以降ではこの全単射によって  $(2^I)_{\leq T}$  と  $2^{I \setminus T}$  を同一視する.

#### 定義 1.41: $T$ -面写像

$I$  を有限集合とする.

- **$T$ -面写像** ( $T$ -face) と呼ばれる  $(\infty, 1)$ -圏の関手を次のように定義する:

$$\begin{aligned} \partial_T: \mathcal{M}\mathbf{fd}^{(I)}(\mathcal{B}) &\longrightarrow \mathcal{M}\mathbf{fd}(\mathcal{B}), \\ (X, c) &\longmapsto c^{-1}(\{T\}) \end{aligned}$$

ただし,  $\text{Int} := \partial_{\emptyset}$  のみ**内部** (interior) と呼ぶ.

- **閉じた  $T$ -面写像** (closed  $T$ -face) と呼ばれる  $(\infty, 1)$ -圏の関手を次のように定義する:

$$\begin{aligned} \bar{\partial}_T: \mathcal{M}\mathbf{fd}^{(I)}(\mathcal{B}) &\xrightarrow{\partial_T} \mathcal{M}\mathbf{fd}(\mathcal{B}) &\hookrightarrow & \mathcal{M}\mathbf{fd}^{(I \setminus T)}(\mathcal{B}), \\ (X, c) &\longmapsto c^{-1}(\{T\}) &\longmapsto & (c^{-1}(\{T\}), (x \mapsto T)) \end{aligned}$$

ただし, 最右辺では  $c^{-1}(\{T\}) \subset \bigcup_{S \leq T} c^{-1}(\{S\})$  と見做している<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>  $c$  を制限して得られる**位相的に coCartesian な射**  $c|_T: \bigcup_{S \leq T} c^{-1}(\{S\}) \longrightarrow (2^I)_{\leq T}$  の値域は  $2^{I \setminus T}$  と同一視できる.

### 定義 1.42: 内部深度

$\langle I \rangle$ -角を持つ conically smooth な層状化空間  $(X, c) \in (\mathcal{M}\mathbf{fld}^{\langle I \rangle}(\mathcal{B}))_0$  を与える.

- $(X, c)$  の内部深度 (interior depth) を以下で定義する:

$$\mathbf{depth}^{\langle \cdot \rangle}(X, c) := \mathbf{depth}(\mathbf{Int}(x, c))$$

- 深度  $\langle k \rangle$  の strata (depth  $\langle k \rangle$ -strata)  $(\mathbf{X}_{\langle k \rangle}, c|_{\mathbf{X}_{\langle k \rangle}}) \subset (X, c)$  とは, 内部深度が  $k$  であってかつ  $\mathbf{Int}(\mathbf{X}_{\langle k \rangle}, c|_{\mathbf{X}_{\langle k \rangle}}) \subset \mathbf{Int}(X, c)$  を充たす,  $(X, c)$  の  $\langle I \rangle$ -角を持つ最大の部分層状化空間のこと.
- $k \geq -1$  に対して, 内部深度  $k$  以下の  $\langle I \rangle$ -角を持つ conically smooth な層状化空間が成す  $\mathbf{Snglr}^{\langle I \rangle}$  の充満部分  $(\infty, 1)$ -圏を

$$\mathbf{Snglr}_{\leq \langle k \rangle}^{\langle I \rangle} \subset \mathbf{Snglr}^{\langle I \rangle}$$

と書く.

$T$  を勝手な有限集合とすると, 【例 1.1.8】と同様の考察により

$$\mathbf{depth}^{\langle \cdot \rangle}((\mathbb{R}_{\geq 0})^T \times \mathbb{R}^n \times (\mathbb{R}_{\geq 0} \times Z)) < \mathbf{depth}^{\langle \cdot \rangle}((\mathbb{R}_{\geq 0})^T \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{C}(Z))$$

が分かる. 故に, 内部深度に関する帰納法が有効である.

### 1.3.1 Unzip と Link

Conically smooth な層状化空間における特異点解消を, 圏論的に自然な形で実装できる.

### 定義 1.43: $\mathbf{Unzip}_k$

内部深度が高々  $k$  であるような  $\langle I \rangle$ -角を持つ conically smooth な層状化空間  $(X, c_X) \in (\mathbf{Snglr}^{\langle I \rangle})_0$  を与える.  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Res}_{(X, c_X)}^k$  を以下のように定義する [?, Definition 7.3.2]:

(対象)

$\langle \{*\} \amalg I \rangle$ -角を持つ conically smooth な層状化空間  $(Y, Y \xrightarrow{c_Y} 2^{\{*\} \amalg I}) \in (\mathbf{Snglr}^{\langle \{*\} \amalg I \rangle})_0$  および conically smooth な層状化写像  $p_Y: Y \rightarrow X$  の組  $((Y, c_Y), p_Y)$  であって, 以下の条件を充たすもの:

- (1)  $(1, 1)$ -圏 **Top** における可換図式

$$\begin{array}{ccc} Y & \xrightarrow{p_Y} & X \\ \downarrow c_Y & & \downarrow c_X \\ 2^{\{*\} \amalg I} & \xrightarrow{\cong} & 2^{\{*\}} \times 2^I \\ & & \uparrow \text{proj}_{2^I} \end{array}$$

が成り立つ.

(2)  $Y$  の 2 つの部分空間

$$\bar{\partial}_{\{*\}}(Y, c_Y), \quad p^{-1}(X_{\langle k \rangle})$$

が一致する.

(射)

2 つの対象  $((Y, c_Y), p_Y), ((Z, c_Z), p_Z)$  の間の射は,

$$\begin{aligned} & \text{Hom}_{\text{Res}^k_{(X, c_X)}} \left( ((Y, c_Y), p_Y), ((Z, c_Z), p_Z) \right) \\ & := \{ f \in \text{Hom}_{\text{Strat}}(Y, Z) \mid c_Z \circ f = c_Y, p_Z \circ f = p_Y \} \end{aligned}$$

と定義する.

- $(X, c_X)$  の  **$k$ -unzip**  $(\text{Unzip}_k(X, c_X), c_{\text{Unzip}_k(X, c_X)}, \pi_k)$  とは,  $(1, 1)$ -圏  $\text{Res}^k_{(X, c_X)}$  における終対象のこと.

$$\text{Unzip}_k(X, c_X) \xrightarrow{\pi_k} X$$

と書く.

- $(X, c_X)$  のリンク (link) とは,

$$\text{Link}_k(X, c_X) := \bar{\partial}_{\{*\}} \text{Unzip}_k(X, c_X) \in (\text{Snglr}^{\langle I \rangle})_0$$

のこと.  $\text{Unzip}_k(X, c_X) \xrightarrow{\pi_k} X$  の制限を

$$\text{Link}_k(X, c_X) \xrightarrow{\pi_k} X_{\langle k \rangle}$$

と略記する.

## 1.4 $(\infty, 1)$ -オペラッドと対称モノイダル $(\infty, 1)$ -圏

### 1.4.1 $(\infty, 1)$ -オペラッドの定義

本資料では,  $(\infty, 1)$ -圏を quasi-category として定義した. この小節では, quai-category における colored operad を定義する.

**定義 1.44:  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Fin}$ ,  $\mathbf{Fin}_*$**

$(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Fin}$  を以下で定義する：

- 有限集合および空集合を対象に持つ.
- $I, J \in \text{Ob}(\mathbf{Fin})$  の間の写像を射とする.

$(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Fin}_*$  を以下で定義する：

- 基点付き有限集合

$$\langle n \rangle := \{*, 1, \dots, n\}$$

を対象に持つ. i.e.

$$\text{Ob}(\mathbf{Fin}_*) := \{ \langle n \rangle \mid n \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \}.$$

- $\forall \langle m \rangle, \langle n \rangle \in \text{Ob}(\mathbf{Fin}_*)$  に対して, それらの間の基点を保つ写像を射とする. i.e.

$$\text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle) := \{ f \in \text{Hom}_{\mathbf{Sets}}(\langle m \rangle, \langle n \rangle) \mid f(*) = * \}.$$

**定義 1.45: inert/active morphism**

- 圏  $\mathbf{Fin}_*$  における射  $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)$  が **inert** であるとは,  $\forall i \in \langle n \rangle \setminus \{*\}$  に対して  $f^{-1}(\{i\}) \subset \langle m \rangle$  が 1 点集合であることを言う.
- 圏  $\mathbf{Fin}_*$  における射  $f \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)$  が **active** であるとは,  $f^{-1}(\{*\}) = \{*\} \subset \langle m \rangle$  であることを言う.

**【例 1.4.1】 inert な射  $\rho^i$**

$1 \leq \forall i \leq \forall n$  を 1 つ固定する. このとき, 写像

$$\begin{aligned} \rho^i: \langle n \rangle &\longrightarrow \langle 1 \rangle, \\ j &\longmapsto \begin{cases} 1, & j = i \\ *, & j \neq i \end{cases} \end{aligned}$$

は圏  $\mathbf{Fin}_*$  における **inert な射** である.  $\rho^i$  は補題 1.12 により,  $\infty$ -オペラッドの「射影」

$$\rho^i_!: \mathcal{O}_{\langle n \rangle}^{\otimes} \longrightarrow \mathcal{O}_{\langle 1 \rangle}^{\otimes}$$

を規定する.

**【例 1.4.2】 active な射  $\alpha_n$**

$\forall n \geq 1$  を 1 つ固定する. このとき, 写像

$$\alpha_n: \langle n \rangle \longrightarrow \langle 1 \rangle,$$

$$j \mapsto \begin{cases} 1, & j \neq * \\ *, & j = * \end{cases}$$

は圏  $\mathbf{Fin}_*$  における **active な射** である.  $\alpha_n$  は射の集合  $\mathrm{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle n \rangle, \langle 1 \rangle)$  の元のうち, 唯一の active な射である.  $\alpha_n$  は,  $n$  点の「テンソル積」を特徴付ける.

脈体の定義において  $[n] \in \mathrm{Ob}(\Delta)$  を  $(1, 1)$ -圏と見做した方法と同様にして, 半順序集合  $\{n-1 \leq n\}$  を  $(1, 1)$ -圏と見做す. このとき,

$$N(\{n-1 \leq n\}) = \left( \begin{array}{ccc} \bullet & \xrightarrow{\quad} & \bullet \\ n-1 & & n \end{array} \right) \cong \Delta^1$$

と図示できる. 同様に,

$$N(\{0 \leq 1\}) = \left( \begin{array}{ccc} \bullet & \xrightarrow{\quad} & \bullet \\ 0 & & 1 \end{array} \right) \cong \Delta^1$$

である.

#### 定義 1.46: $p$ -Cartesian morphism

$p: \mathcal{E} \rightarrow \mathcal{B}$  を **内的ファイブレーション** とする.

- $\mathcal{E}$  の 1-射  $(x \xrightarrow{f} y) \in \mathcal{E}_1$  が以下の条件を充たすとき,  $f$  は  **$p$ -Cartesian** であると言う:  
**(Cartesian)**  $\forall n \geq 2$  に対して, 以下の  $\mathbf{sSet}$  の図式を可換にする  $\mathcal{E}$  の  $n$ -射  $\bar{\varphi} \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^n, \mathcal{E})$  が存在する:

$$\begin{array}{ccc} N(\{n-1 \leq n\}) \cong \Delta^1 & & \\ \downarrow & \searrow f & \\ \Lambda_n^n & \xrightarrow{\forall \varphi_0} & \mathcal{E} \\ \downarrow & \searrow \exists \bar{\varphi} & \downarrow p \\ \Delta^n & \xrightarrow{\forall \varphi} & \mathcal{B} \end{array}$$

ただし,  $\mathbf{sSet}$  の射  $f: N(\{n-1 \leq n\}) \rightarrow \mathcal{E}$  とは

$$f_{[1]} \left( \begin{array}{ccc} \bullet & \xrightarrow{\quad} & \bullet \\ n-1 & & n \end{array} \right) = \begin{array}{ccc} \bullet & \xrightarrow{f} & \bullet \\ x & & y \end{array}$$

を充たす唯一の自然変換である.

- $\mathcal{E}$  の 1-射  $(x \xrightarrow{f} y) \in \mathcal{E}_1$  が以下の条件を充たすとき,  $f$  は  **$p$ -coCartesian** である<sup>a</sup>と言う:  
**(coCartesian)**  $\forall n \geq 2$  に対して, 以下の  $\mathbf{sSet}$  の図式を可換にする  $\mathcal{E}$  の  $n$ -射  $\bar{\varphi} \in \mathrm{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^n, \mathcal{E})$  が存在する:



$$\begin{array}{ccc}
N(\{0 \leq 1\}) \cong \Delta^1 & & \\
\downarrow & \searrow f & \\
\Lambda_0^n & \xrightarrow{\forall \varphi_0} & \mathcal{E} \\
\downarrow & \nearrow \exists \tilde{\varphi} & \downarrow p \\
\Delta^n & \xrightarrow{\forall \varphi} & \mathcal{B}
\end{array}$$

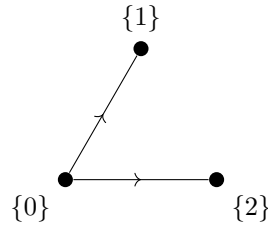
ただし,  $\mathbf{sSet}$  の射  $f: N(\{0 \leq 1\}) \rightarrow \mathcal{E}$  とは

$$f_{[1]} \left( \begin{array}{c} \bullet \xrightarrow{\quad} \bullet \\ n-1 \quad n \end{array} \right) = \begin{array}{c} \bullet \xrightarrow{f} \bullet \\ x \quad y \end{array}$$

を充たす唯一の自然変換である.

<sup>a</sup> もしくは, なぜか  $p$ -coCartesian morphism とは呼ばずに  **$p$ -coCartesian edge** と呼ぶことが多い.

$n = 2$  の場合の (**coCartesian**) の可換図式の意味を, 系??を用いて解説しよう. まず, 包含  $N(\{0 \leq 1\}) \hookrightarrow \Lambda_0^2$  というのは, 系??による角  $\Lambda_0^2$  の図示



のうち辺  $\{0\} \rightarrow \{1\}$  への埋め込みであるから, 可換図式の

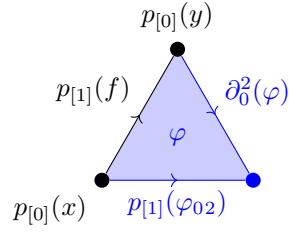
$$\begin{array}{ccc}
N(\{0 \leq 1\}) \cong \Delta^1 & & \\
\downarrow & \searrow f & \\
\Lambda_0^2 & \xrightarrow{\forall \varphi_0} & \mathcal{E}
\end{array}$$

の部分は勝手な角の図式  $\varphi_0 = (\bullet, f, \varphi_{02}) \in \mathcal{E}_1^{\times 2}$  を与えることに対応する. 図示すると

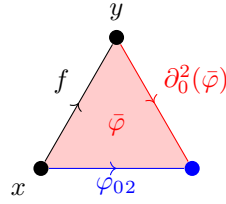
$$\varphi_0 = \begin{array}{c} y \\ \bullet \\ \nearrow f \\ \bullet \\ x \end{array} \xrightarrow{\varphi_{02}} \bullet \quad (1.4.1)$$

となる. 従って, (**coCart-2**) の主張は次のような意味を持つ:

$(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{B}$  において角の図式が 2-射  $\varphi \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^2, \mathcal{B}) \cong \mathcal{B}_2$  によって



と埋められているならば、 $\mathcal{E}$  において角の図式 (1.4.1) を



のように埋める 2-射  $\bar{\varphi} \in \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^2, \mathcal{E}) \cong \mathcal{E}_2$  が存在する.

#### 定義 1.47: デカルトファイブレーション

$p: \mathcal{E} \rightarrow \mathcal{B}$  を **内的ファイブレーション** とする.

- $p$  が **デカルトファイブレーション** (Cartesian fibration) であるとは,
  - $\mathcal{B}$  の任意の 1 射  $(x \xrightarrow{f} y) \in \mathcal{B}_1$
  - $p_{[0]}(\bar{y}) = y$  を充たす  $\mathcal{E}$  の任意の対象  $\bar{y} \in \mathcal{E}_0$

に対して, 以下の条件を充たす  $\mathcal{E}$  の 1-射  $(z \xrightarrow{\bar{f}} \bar{y}) \in \mathcal{E}_1$  が存在することを言う:

**(Cart-1)**

$\bar{f}$  は  $f$  の持ち上げである. i.e.  $p_{[1]}(\bar{f}) = f$  が成り立つ.

**(Cart-2)**

$\bar{f}$  は  **$p$ -Cartesian** である.

特に,  $\bar{f}$  のことを  $f$  の  **$p$ -Cartesian lift** と呼ぶ.

- $p$  が **余デカルトファイブレーション** (coCartesian fibration) であるとは,
  - $\mathcal{B}$  の任意の 1 射  $(x \xrightarrow{f} y) \in \mathcal{B}_1$
  - $p_{[0]}(\bar{x}) = x$  を充たす  $\mathcal{E}$  の任意の対象  $\bar{x} \in \mathcal{E}_0$

に対して, 以下の条件を充たす  $\mathcal{E}$  の 1-射  $(\bar{x} \xrightarrow{\bar{f}} z) \in \mathcal{E}_1$  が存在することを言う:

**(coCart-1)**

$\bar{f}$  は  $f$  の持ち上げである. i.e.  $p_{[1]}(\bar{f}) = f$  が成り立つ.

**(coCart-2)**

$\bar{f}$  は  **$p$ -coCartesian** である.

特に,  $\bar{f}$  のことを  $f$  の  **$p$ -coCartesian lift** と呼ぶ.

### 定義 1.48: $(\infty, 1)$ -オペラッド

$(\infty, 1)$ -オペラッド  $((\infty, 1)\text{-operad})^a$  とは,  $(\infty, 1)$ -圏の関手

$$p: \mathcal{O}^\otimes \longrightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$$

であって以下の条件を充たすもののこと [?, Definition 2.1.1.10.] :

#### (Op-1)

任意の **inert** な射  $\alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)$  および  $\forall x \in (\mathcal{O}_{\langle m \rangle}^\otimes)_0$  に対して,  $\mathcal{O}^\otimes$  における  **$p$ -coCartesian** な 1-射  $(x \xrightarrow{\bar{\alpha}} y) \in (\mathcal{O}^\otimes)_1$  が存在して  $p_{[1]}(\bar{\alpha}) = \alpha$  を充たす.

#### (Op-2)

$\forall \alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)$  および  $\forall x \in (\mathcal{O}_{\langle m \rangle}^\otimes)_0, \forall y \in (\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes)_0$  に対して, 【例 1.4.1】の inert な射の族  $\{\rho^i \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle n \rangle, \langle 1 \rangle)\}_{1 \leq i \leq n}$  に (Op-1) を適用して得られる  **$p$ -coCartesian** な 1-射の族  $\{y \xrightarrow{\bar{\rho}^i} y_i \in (\mathcal{O}^\otimes)_1\}_{1 \leq i \leq n}$  が誘導する Kan 複体の関手<sup>b</sup>

$$\text{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y)_\alpha \longrightarrow \prod_{i=1}^n \text{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y_i)_{\rho^i \circ \alpha}$$

はホモトピー同値である.

#### (Op-3)

$\forall x_1, \dots, x_n \in (\mathcal{O}_{\langle 1 \rangle}^\otimes)_0$  に対して, ある  $x \in (\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes)_0$  および  **$p$ -coCartesian** な 1-射  $\hat{\rho}_i \in (\text{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, x_i)_{\rho^i})_0$  が存在する.

ただし, 以下の記法を採用した:

- 点  $\langle n \rangle \in \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)_0$  における  $(\infty, 1)$ -圏の関手  $p: \mathcal{O}^\otimes \longrightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  のファイバー  $\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes$  を,  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  における引き戻し

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes & \xrightarrow{\quad} & \Delta^0 \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow \langle n \rangle \\ \mathcal{O}^\otimes & \xrightarrow{p} & \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*) \end{array}$$

と定義した<sup>c</sup>.

- $\alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)$  および  $x \in (\mathcal{O}_{\langle m \rangle}^\otimes)_0, y \in (\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes)_0$  に対して,  $\alpha$  上の射の空間  $\text{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y)_\alpha$  を,  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  における引き戻し

$$\begin{array}{ccc} \text{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y)_\alpha & \xrightarrow{\quad} & \Delta^0 \\ \downarrow & \lrcorner & \downarrow \alpha \\ \text{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y) & \xrightarrow{p} & \text{Map}_{\mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)}(\langle m \rangle, \langle n \rangle) \end{array}$$

と定義した<sup>d</sup> [?, Tag 01P2].

<sup>a</sup>  $\infty$ -operad と呼ばれる.

<sup>b</sup> つまり, これは  $(\bar{\rho}^1, \dots, \bar{\rho}^n) \in \prod_{i=1}^n \text{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(y, y_i)_0$  による後合成である. この関手は up to homotopy でしか定まらないのだった.

<sup>c</sup> これ自体が  $(\infty, 1)$ -圏である.

<sup>d</sup> これ自体が Kan 複体である. なお, 下の横向き射は, 定義??に登場したものである.

### 補題 1.12: Segal 条件

$(\infty, 1)$ -圏の関手

$$p: \mathcal{O}^\otimes \longrightarrow N(\mathbf{Fin}_*)$$

であって条件 **(Op-1)**, **(Op-2)** を満たすものを与える. このとき, 条件 **(Op-3)** は以下と同値である<sup>a</sup>:

**(Segal)**

$\forall n \geq 0$  に対して, 【例 1.4.1】の inert な射の族  $\{\rho^i \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle n \rangle, \langle 1 \rangle)\}_{1 \leq i \leq n}$  が条件 **(Op-1)** により誘導する  $(\infty, 1)$ -圏の関手の族  $\{\rho_i^!: \mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes \longrightarrow \mathcal{O}_{\langle 1 \rangle}^\otimes\}_{1 \leq i \leq n}$  は,  $(\infty, 1)$ -圏同値

$$(\rho_1^!, \dots, \rho_n^!): \mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes \xrightarrow{\sim} (\mathcal{O}_{\langle 1 \rangle}^\otimes)^{\times n} \quad (1.4.2)$$

を与える.

<sup>a</sup> 一般に Segal 条件というと  $n$ -fold pullback のことだが, 現在は  $\mathcal{O}_{\langle 0 \rangle}^\otimes$  が contractible なので  $n$ -fold product になっている.

**証明**  $\forall x \in (\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes)_0$  は, 定義から  $x \in \mathcal{O}_0^\otimes$  かつ  $p_{[0]}(x) = \langle n \rangle$  を満たす. 故に **(Op-1)** から, inert な射の族  $\{\rho^i \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle n \rangle, \langle 1 \rangle)\}_{1 \leq i \leq n}$  の  $p$ -coCartesian lift  $\{x \xrightarrow{\bar{\rho}_x^i} x_i \in (\mathcal{O}_{\langle 1 \rangle}^\otimes)_1\}_{1 \leq i \leq n}$  が存在する.

まず,  $(\infty, 1)$ -圏の関手 (1.4.2) が具体的にどのように構成されるのかを見よう.

#### 0-射

$p_{[0]}(x_i) = p_{[0]}(\partial_0^1 \bar{\rho}^i) = \partial_0^1 p_{[1]}(\bar{\rho}^i) = \partial_0^1 \rho^i = \langle 1 \rangle$  より  $x_i \in (\mathcal{O}_{\langle 1 \rangle}^\otimes)_0$  である. したがって

$$\begin{aligned} \rho_{[0]}^i: (\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes)_0 &\longrightarrow (\mathcal{O}_{\langle 1 \rangle}^\otimes)_0, \\ x &\longmapsto x_i \end{aligned}$$

と定義する.

#### 1-射

$\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes$  の定義から,  $\forall (x \xrightarrow{f} y) \in (\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes)_1 \subset \mathcal{O}_1^\otimes$  に対して  $p_{[1]}(f) = \text{Id}_{\langle n \rangle}$  が成り立つ. i.e.  $\rho^i = (\langle n \rangle \xrightarrow{\text{Id}_{\langle n \rangle}} \langle n \rangle \xrightarrow{\rho^i} \langle 1 \rangle) \in N(\mathbf{Fin}_*)_2$  について<sup>\*30</sup>,  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  の可換図式

$$\begin{array}{ccc} \Lambda_1^2 & \xrightarrow{(f, \bullet, \rho_y^i)} & \mathcal{O}^\otimes \\ \downarrow & & \downarrow p \\ \Delta^2 & \xrightarrow{\rho^i} & N(\mathbf{Fin}_*) \end{array}$$

<sup>\*30</sup> 脈体の 2-射の記法 (??) を用いた.

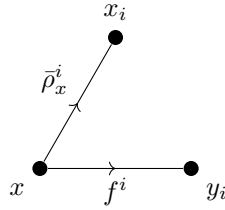
が成り立つ．そのうえ  $p: \mathcal{O}^\otimes \longrightarrow N(\mathbf{Fin}_*)$  は**内的ファイブレーション**だから

$$\begin{array}{ccc} \Lambda_1^2 & \xrightarrow{(f, \bullet, \bar{\rho}_y^i)} & \mathcal{O}^\otimes \\ \downarrow & \nearrow \exists \sigma_f & \downarrow p \\ \Delta^2 & \xrightarrow{\rho^i} & N(\mathbf{Fin}_*) \end{array}$$

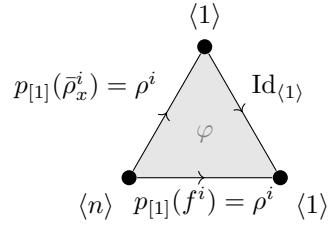
である．このとき  $f^i := \partial_1^2(\sigma_f)$  とおくと， $p$  が自然変換であることと単体的恒等式から

$$\begin{aligned} p_{[1]}(f^i) &= p_{[1]} \circ \partial_1^2(\sigma_f) = \partial_1^2 \circ p_{[1]}(\sigma_f) = \rho^i, \\ \partial_1^1(f^i) &= x, \\ \partial_0^1(f^i) &= y^i, \\ \partial_1^1(p_{[1]}(f^i)) &= \langle n \rangle, \\ \partial_0^1(p_{[1]}(f^i)) &= \langle 1 \rangle \end{aligned}$$

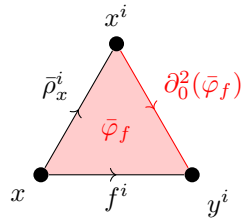
が成り立つ．i.e.  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{O}^\otimes$  において



と図示できる．一方， $\varphi := (\langle n \rangle \xrightarrow{\rho^i} \langle 1 \rangle \xrightarrow{\text{Id}_{\langle 1 \rangle}} \langle 1 \rangle) \in N(\mathbf{Fin}_*)_2$  は  $(\infty, 1)$ -圏  $N(\mathbf{Fin}_*)$  において



と図示できる．故に， $\rho^i$  が **p-coCartesian** であることから  $\bar{\varphi}_f \in \mathcal{O}_2^\otimes$  が存在して



となる．以上の構成より，

$$\begin{aligned} \rho_{[1]}^i: (\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes)_1 &\longrightarrow (\mathcal{O}_{\langle 1 \rangle}^\otimes)_1, \\ (x \xrightarrow{f} z) &\longmapsto (x_i \xrightarrow{\partial_0^2(\bar{\varphi}_f)} y_i) \end{aligned}$$

と定義する．この定義は  $\sigma_f$  の選び方および  $\bar{\varphi}$  の選び方の不定性がある．これらの不定性はそれぞれ  $\bar{\rho}_y^i$  の後合成および  $\bar{\rho}_x^i$  の前合成が up to homotopy でしか定まらないという事実に対応している．

$m \geq 1$ -射

$\forall x, y \in (\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes)_0$  を固定する．定義から,  $\forall p \geq 1$  に対して

$$\mathrm{Map}_{\mathcal{O}_{\langle p \rangle}^\otimes}(x, y) = \mathrm{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y)_{\mathrm{Id}_{\langle p \rangle}}$$

が成り立つことに注意する．すると, 前合成および後合成により, Kan 複体の関手

$$\begin{aligned} \mathrm{Map}_{\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^\otimes}(x, y) &= \mathrm{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y)_{\mathrm{Id}_{\langle n \rangle}} \xrightarrow{\prod_{i=1}^n [\bar{\rho}_y^i]^*} \prod_{i=1}^n \mathrm{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y_i)_{\rho^i} \\ &\xleftarrow{\prod_{i=1}^n [\bar{\rho}_x^i]^*} \prod_{i=1}^n \mathrm{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x_i, y_i)_{\mathrm{Id}_{\langle 1 \rangle}} = \prod_{i=1}^n \mathrm{Map}_{\mathcal{O}_{\langle 1 \rangle}^\otimes}(x_i, y_i) \end{aligned} \quad (1.4.3)$$

が up to homotopy で定まる．**(OP-1)** より  $\bar{\rho}_x^i$  が  $p$ -coCartesian なので,  $[\bar{\rho}_x^i]^*: \mathrm{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x_i, y_i)_{\mathrm{Id}_{\langle 1 \rangle}} \rightarrow \mathrm{Map}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y_i)_{\rho^i}$  はホモトピー同値であり [?, [Tag 01U8](#)], up to homotopy で向きを逆にできる．このようにして  $\forall m \geq 1$  射の対応が定まる．

**(OP-3)  $\implies$  (Segal)**

**(OP-3)** を仮定する．命題??より,  $(\infty, 1)$ -圏の関手 (1.4.2) が忠実充満かつ本質的全射であることを示せば良い．まず, **(OP-2)** により (1.4.3) はホモトピー同値だから, (1.4.2) は忠実充満である．

(1.4.2) が本質的全射であることは **(OP-3)** より従う．

**(OP-3)  $\longleftarrow$  (Segal)** 明らか．

■

### 定義 1.49: $(\infty, 1)$ -オペラッドの射

$(\infty, 1)$ -オペラッド  $p: \mathcal{O}^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  を与える. このとき,  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{O}^\otimes$  の 1-射  $f \in (\mathcal{O}^\otimes)_1$  が **inert** であるとは, 以下の 2 条件を充たすことを言う:

**(inert-1)**  $p_{[1]}(f)$  は  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{Fin}_*$  における **inner な射** である.

**(inert-2)**  $f$  は  **$p$ -coCartesian** な 1-射である.

2 つの  $(\infty, 1)$ -オペラッド  $p: \mathcal{O}^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$ ,  $p': \mathcal{O}'^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  を与える. このとき,  $(\infty, 1)$ -圏の開手  $f: \mathcal{O}^\otimes \rightarrow \mathcal{O}'^\otimes$  が  $(\infty, 1)$ -オペラッドの射 ( $\infty$ -operad map) であるとは, 以下の 2 つの条件を充たすことを言う [?, Definition 2.1.2.7.]:

**(Opmap-1)**  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  の図式

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{O}^\otimes & \xrightarrow{f} & \mathcal{O}'^\otimes \\ & \searrow p & \swarrow p' \\ & \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*) & \end{array}$$

は可換である.

**(Opmap-2)** 1-射の間の写像  $f_{[1]}: (\mathcal{O}^\otimes)_1 \rightarrow (\mathcal{O}'^\otimes)_1$  により, inert な 1-射が保存される<sup>a</sup>.

<sup>a</sup> 条件 **(Opmap-1)** より, inert な 1-射の  $p_{[1]}$  による像が条件 **(inert-1)** を充たすことは明らかである.



以降では  $(\infty, 1)$ -オペラッド  $\mathcal{O}^\otimes$  に対して  $\mathcal{O} := \mathcal{O}_{(1)}^\otimes$  とおき,  $\mathcal{O}^\otimes$  の underlying  $(\infty, 1)$ -category と呼ぶ.

### 定義 1.50: $\mathcal{C}^\otimes$ 上の $\mathcal{O}$ -代数

$\mathcal{O}^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$ ,  $\mathcal{C}^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  を  $(\infty, 1)$ -オペラッドとする.  $\mathcal{C}$  上の  $\mathcal{O}$ -代数とは,  $(\infty, 1)$ -オペラッドの射が成す充満部分  $(\infty, 1)$ -圏

$$\mathbf{Alg}_{\mathcal{O}}(\mathcal{C}) \subset \mathbf{Fun}_{\mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)}(\mathcal{O}^\otimes, \mathcal{C}^\otimes)$$

のこと [?, Definition 2.1.2.7.].

**Kan-豊穠圏**  $\mathbf{Op}_{(\infty, 1)}^\Delta$  を次のように構成する:

- $(\infty, 1)$ -オペラッドを対象とする.
- $\mathbf{Alg}_{\mathcal{O}}(\mathcal{C})$  の芯  $\mathbf{Alg}_{\mathcal{O}}(\mathcal{C})^\cong \in \mathbf{Ob}(\mathbf{Kan})$  を Hom 対象とする.

### 定義 1.51: $(\infty, 1)$ -オペラッドの成す $(\infty, 1)$ -圏

$(\infty, 1)$ -圏  $\mathbf{Op}_{(\infty, 1)}$  を以下で定義する [?, Definition 2.1.4.1.]:

$$\mathbf{Op}_{(\infty, 1)} := \mathbf{N}_{\mathbf{hc}}(\mathbf{Op}_{(\infty, 1)}^\Delta)$$

### 1.4.2 $\mathcal{O}$ -モノイダル $(\infty, 1)$ -圏

次に、対称モノイダル圏の  $(\infty, 1)$ -圏論における対応物を考える。

#### 定義 1.52: $\mathcal{O}$ -モノイダル $(\infty, 1)$ -圏

- $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}^\otimes$
- $(\infty, 1)$ -オペラッド  $r: \mathcal{O}^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$

を与える。  $(\infty, 1)$ -圏の関手  $p: \mathcal{C}^\otimes \rightarrow \mathcal{O}^\otimes$  が  $(\infty, 1)$ -オペラッドの **coCartesian ファイブレーション** (coCartesian fibration of  $(\infty, 1)$ -operads) であるとは、以下の条件を充たすことを言う：

##### (Op-coCart-1)

$p: \mathcal{C}^\otimes \rightarrow \mathcal{O}^\otimes$  は **coCartesian ファイブレーション** である。

##### (Op-coCart-2)

$\mathcal{C}^\otimes \xrightarrow{p} \mathcal{O}^\otimes \xrightarrow{r} \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  は  $(\infty, 1)$ -オペラッドである。

特にこのとき、 $p$  は  $\mathcal{C}^\otimes$  を  **$\mathcal{O}$ -モノイダル  $(\infty, 1)$ -圏** にしている ( $p$  exhibits  $\mathcal{C}^\otimes$  as  $\mathcal{O}$ -monoidal  $(\infty, 1)$ -category) と言う<sup>a</sup> [?, Definition 2.1.2.13.]。

<sup>a</sup> なお、この定義から  $p$  は  $(\infty, 1)$ -オペラッドの射でもあることが分かる [?, Remark 2.1.2.14.]。

#### 定義 1.53: 対称モノイダル $(\infty, 1)$ -圏

**$\mathcal{O}$ -モノイダル  $(\infty, 1)$ -圏**  $\mathcal{C}^\otimes \xrightarrow{p} \mathcal{O}^\otimes$  において  $\mathcal{O}^\otimes = \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  ならば、 $\mathcal{C}^\otimes$  は**対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -圏** (symmetric monoidal  $(\infty, 1)$ -category) であると言う。

i.e. 対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -圏とは、 $(\infty, 1)$ -オペラッド  $\mathcal{C}^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  であって **coCartesian ファイブレーション**でもあるもののこと [?, Example 2.1.2.18.]

#### 定義 1.54: $\mathcal{O}$ -モノイダル $(\infty, 1)$ -関手

- $(\infty, 1)$ -オペラッド  $\mathcal{O}^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$
- $(\infty, 1)$ -オペラッドの **coCartesian ファイブレーション**  $p: \mathcal{C}^\otimes \rightarrow \mathcal{O}^\otimes, q: \mathcal{D}^\otimes \rightarrow \mathcal{O}^\otimes$

を与える。  $f \in \mathrm{Alg}_{\mathcal{C}}(\mathcal{D})$  が  **$\mathcal{O}$ -モノイダル  $(\infty, 1)$ -関手** ( $\mathcal{O}$ -monoidal  $(\infty, 1)$ -functor) であるとは、それが全ての  **$p$ -coCartesian な 1-射**を  **$q$ -coCartesian な 1-射**へ移すことを言う。

$\mathcal{O}$ -モノイダル  $(\infty, 1)$ -関手が成す**充満部分  $(\infty, 1)$ -圏**を

$$\mathcal{F}\mathrm{un}_{\mathcal{O}}^{\otimes}(\mathcal{C}, \mathcal{D}) \subset \mathcal{F}\mathrm{un}_{\mathcal{O}^\otimes}(\mathcal{C}^\otimes, \mathcal{D}^\otimes)$$

と書く [?, Definition 2.1.3.7.]。



**定義 1.55: 対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -関手**

対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{C}^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$ ,  $\mathcal{D}^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  の間の対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -関手 (symmetric monoidal  $(\infty, 1)$ -functor) とは,  $f \in \mathbf{Alg}_{\mathcal{C}}(\mathcal{D})$  であって全ての **coCartesian** な 1-射を保存するもののこと. 対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -関手が成す**充満部分  $(\infty, 1)$ -圏**

$$\mathcal{F}\mathbf{un}^\otimes(\mathcal{C}, \mathcal{D}) \subset \mathcal{F}\mathbf{un}_{\mathbf{Fin}_*}(\mathcal{C}^\otimes, \mathcal{D}^\otimes)$$

と書く [?, Definition 2.1.3.7.].

**Kan-豊穡圏  $\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}^\otimes$**  を次のように構成する:

- 対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -圏を対象とする.
- $\mathcal{F}\mathbf{un}^\otimes(\mathcal{C}, \mathcal{D})$  の芯  $\mathcal{F}\mathbf{un}^\otimes(\mathcal{C}, \mathcal{D})^\cong \in \mathbf{Ob}(\mathbf{Kan})$  を Hom 対象とする.

**定義 1.56: 対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -圏が成す  $(\infty, 1)$ -圏**

$(\infty, 1)$ -圏  $\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}^\otimes$  を以下で定義する [?, Variant 2.1.4.13.]:

$$\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}^\otimes := \mathbf{N}_{\mathbf{hc}}(\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}^\otimes)^\Delta \subset \mathbf{Op}_{(\infty, 1)}$$

定義 1.48 がオペラッドと呼ぶにふさわしいことを示すために, 次の小節では  $(1, 1)$ -圏の文脈で対応物を考えよう.

### 1.4.3 色付きオペラッドと $(1, 1)$ -圏の coCartesian fibration

**定義 1.57: colored operad**

色付きオペラッド<sup>a</sup> (colored operad)  $\mathcal{O}$  は, 以下の 4 つのデータから成る:

- 対象<sup>b</sup> (object) の集まり

$$\mathbf{Ob}(\mathcal{O})$$

- $\forall I \in \mathbf{Ob}(\mathbf{Fin}), \forall \{x_i \in \mathbf{Ob}(\mathcal{O})\}_{i \in I}, \forall y \in \mathbf{Ob}(\mathcal{O})$  の 3 つ組に対して定まっている,  $\{x_i\}_{i \in I}$  から  $y$  へ向かう**多射** (multimorphism) の集合

$$\mathbf{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x_i\}_{i \in I}, y) \in \mathbf{Ob}(\mathbf{Sets})$$

- $\forall \alpha \in \mathbf{Hom}_{\mathbf{Fin}}(I, J), \forall \{x_i \in \mathbf{Ob}(\mathcal{O})\}_{i \in I}, \{y_j \in \mathbf{Ob}(\mathcal{O})\}_{j \in J}, \forall z \in \mathbf{Ob}(\mathcal{O})$  の 4 つ組に対して定まっている, 多射の**合成** (composition map) と呼ばれる写像

$$\circ_\alpha: \mathbf{Mul}_{\mathcal{O}}(\{y_j\}_{j \in J}, z) \times \prod_{j \in J} \mathbf{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x_i\}_{i \in \alpha^{-1}(\{j\})}, y_j) \longrightarrow \mathbf{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x_i\}_{i \in I}, z),$$

$$(G, (F_j)_{j \in J}) \longmapsto G \circ_\alpha (F_j)_{j \in J}$$

- **恒等射** (identity) と呼ばれる多射の族  $\{\mathrm{Id}_x \in \mathbf{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x\}, x)\}_{x \in \mathbf{Ob}(\mathcal{O})}$

これらは以下の条件を充たさねばならない：

**(cOp-1)**

恒等射は合成に関して単位元として振る舞う。

**(cOp-2)**

多射の合成は結合則を充たす. i.e.  $\forall \alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}}(I, J), \forall \beta \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}}(J, K), \forall \{x_i \in \text{Ob}(\mathcal{O})\}_{i \in I}, \forall \{y_j \in \text{Ob}(\mathcal{O})\}_{j \in J}, \forall \{z_k \in \text{Ob}(\mathcal{O})\}_{k \in K}, \forall w \in \text{Ob}(\mathcal{O})$  に対して,  $(1, 1)$ -圏 **Sets** の図式

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{z_k\}_{k \in K}, w) \times \prod_{k \in K} \text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{y_j\}_{j \in \beta^{-1}(\{k\})}, z_k) \times \prod_{j \in J} \text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x_i\}_{i \in \alpha^{-1}(\{j\})}, y_j) & & \\
 & \swarrow \circ_{\beta} \times \text{Id} & & \searrow \text{Id} \times (\circ_{\alpha}|_{\alpha^{-1}(\beta^{-1}(\{k\}))})_{k \in K} & \\
 \text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{y_j\}_{j \in J}, w) \times \prod_{j \in J} \text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x_i\}_{i \in \alpha^{-1}(\{j\})}, y_j) & & & & \text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{z_k\}_{k \in K}, w) \times \prod_{k \in K} \text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x_i\}_{i \in (\beta \circ \alpha)^{-1}(\{k\})}, z_k) \\
 & \searrow \circ_{\alpha} & & \swarrow \circ_{\beta \circ \alpha} & \\
 & \text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x_i\}_{i \in I}, z) & & & 
 \end{array}$$

は可換である。

<sup>a</sup> いわゆる対称色付きオペラッド (symmetric colored operad) である。

<sup>b</sup> 色 (color) と呼ばれることもある。

色付きオペラッドの定義において, 写像  $\alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}}(I, J)$  が多射の合成の「型」を規定している。

**定義 1.58:  $(1, 1)$ -圏における coCartesian fibration**

$p: \mathcal{E} \longrightarrow \mathcal{B}$  を  $(1, 1)$ -圏の関手とする。

- $\mathcal{E}$  の射  $\bar{f} \in \text{Hom}_{\mathcal{E}}(\bar{x}, \bar{y})$  が以下の条件を充たすとき,  $\bar{f}$  は  **$p$ -coCartesian** であると言う：

**(coCart-ord)**  $(1, 1)$ -圏  $\mathcal{B}$  の図式

$$\begin{array}{ccc}
 & p(\bar{y}) & \\
 p(\bar{f}) \nearrow & & \searrow \forall \varphi \\
 p(\bar{x}) & \xrightarrow{p(\forall \varphi_0)} & p(\forall \bar{z})
 \end{array}$$

を可換にする勝手な 2 つの射  $\varphi_0 \in \text{Hom}_{\mathcal{E}}(\bar{x}, \bar{z}), \varphi \in \text{Hom}_{\mathcal{B}}(p(\bar{y}), p(\bar{z}))$  に対して, 射  $\bar{\varphi} \in \text{Hom}_{\mathcal{E}}(\bar{y}, \bar{z})$  が一意的存在して  $(1, 1)$ -圏  $\mathcal{E}$  の図式

$$\begin{array}{ccc}
 & \bar{y} & \\
 \bar{f} \nearrow & & \searrow \exists! \bar{\varphi} \\
 \bar{x} & \xrightarrow{\varphi_0} & \bar{z}
 \end{array}$$

を可換にする。

- $p$  が **coCartesian fibration** であるとは,

- $(1, 1)$ -圏  $\mathcal{B}$  の任意の射  $f \in \text{Hom}_{\mathcal{B}}(x, y)$
  - $p(\bar{x}) = x$  を満たす  $(1, 1)$ -圏  $\mathcal{E}$  の対象  $\bar{x} \in \text{Ob}(\mathcal{E})$
- に対して, 以下の条件を満たす  $(1, 1)$ -圏  $\mathcal{E}$  の射  $\bar{f} \in \text{Hom}_{\mathcal{E}}(\bar{x}, z)$  が存在することを言う:
- (coCart-ord-1)**  
 $\bar{f}$  は  $f$  の持ち上げである. i.e.  $p(\bar{f}) = f$  が成り立つ.
- (coCart-ord-2)**  
 $\bar{f}$  は  $p$ -coCartesian である.

定義 1.48 に合わせて,  $(1, 1)$ -圏の関手

$$p: \mathcal{O}^{\otimes} \longrightarrow \mathbf{Fin}_* \quad (1.4.4)$$

であって以下の 3 条件を満たすものを考えてみる:

**(OP-ord-1)**

任意の inert な射  $\alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)$  および  $\forall x \in \text{Ob}(\mathcal{O}^{\otimes}_{\langle m \rangle})$  に対して,  $\mathcal{O}^{\otimes}$  における  $p$ -coCartesian な射  $\bar{\alpha} \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}}(x, y)$  が存在して  $p(\bar{\alpha}) = \alpha$  を満たす.

**(OP-ord-2)**

$\forall \alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)$  および  $\forall x \in \text{Ob}(\mathcal{O}^{\otimes}_{\langle m \rangle}), \forall y \in \text{Ob}(\mathcal{O}^{\otimes}_{\langle n \rangle})$  に対して, inert な射  $\rho^i \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle n \rangle, \langle 1 \rangle)$  に **(Op-ord-1)** を適用して得られる  $p$ -coCartesian な射の族  $\{\bar{\rho}_y^i \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}}(y, y_i)\}_{1 \leq i \leq n}$  が誘導する写像

$$\begin{aligned} \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}}(x, y)_{\alpha} &\longrightarrow \prod_{i=1}^n \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}}(x, y_i)_{\rho^i \circ \alpha}, \\ \varphi &\longmapsto (\bar{\rho}^1 \circ \varphi, \dots, \bar{\rho}^n \circ \varphi) \end{aligned}$$

は,  $(1, 1)$ -圏 **Sets** における同型射 (i.e. 全単射) である.

**(OP-ord-3)**

$\forall x_1, \dots, x_n \in \text{Ob}(\mathcal{O}^{\otimes}_{\langle 1 \rangle})$  に対して, ある  $x \in \text{Ob}(\mathcal{O}^{\otimes}_{\langle n \rangle})_0$  および  $p$ -coCartesian な射  $\hat{\rho}_i \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}}(x, x_i)_{\rho^i}$  が存在する.

ここで, **Cat** における引き戻し

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{O}^{\otimes}_{\langle n \rangle} & \xrightarrow{\quad} & * \\ \downarrow & & \downarrow \langle n \rangle \\ \mathcal{O}^{\otimes} & \xrightarrow{p} & \mathbf{Fin}_* \end{array}$$

により  $(1, 1)$ -圏  $\mathcal{O}^{\otimes}_{\langle n \rangle}$  を定義している. 具体的には

$$\begin{aligned} \text{Ob}(\mathcal{O}^{\otimes}_{\langle n \rangle}) &= \{x \in \text{Ob}(\mathcal{O}^{\otimes}) \mid p(x) = \langle n \rangle\}, \\ \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}_{\langle n \rangle}}(x, y) &= \{f \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}} \mid p(f) = \text{Id}_{\langle n \rangle}\} \end{aligned}$$

である. さらに,  $\forall \alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)$  に対して **Sets** の引き戻しにより

$$\begin{array}{ccc}
\text{Hom}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y)_\alpha & \xrightarrow{\quad} & * \\
\downarrow & & \downarrow \alpha \\
\text{Hom}_{\mathcal{O}^\otimes}(x, y) & \xrightarrow{p} & \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)
\end{array}$$

と定義した.

#### 定義 1.59: Category of operators

いま, **colored operad**  $\mathcal{O}$  が与えられたとする. このとき **category of operators** と呼ばれる  $(1, 1)$ -圏  $\mathcal{O}^\otimes$  を次のように定義する:

- 2 つ組  $(\langle n \rangle; x_1, \dots, x_n) \in \text{Ob}(\mathbf{Fin}_*) \times \text{Ob}(\mathcal{O})$  を対象に持つ.
- $\forall (\langle m \rangle; x_1, \dots, x_m), (\langle n \rangle; y_1, \dots, y_n) \in \text{Ob}(\mathcal{O}^\otimes)$  に対して,  $\text{Hom}$  集合を

$$\begin{aligned}
& \text{Hom}_{\mathcal{O}^\otimes} \left( (\langle m \rangle; x_1, \dots, x_m), (\langle n \rangle; y_1, \dots, y_n) \right) \\
& := \coprod_{\alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)} \prod_{j=1}^n \text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x_i\}_{i \in \alpha^{-1}(\{j\})}, y_j)
\end{aligned}$$

と定義する.

- 射の合成は,  $\mathbf{Fin}_*$  における射の合成および  $\mathcal{O}$  における多射の合成によって定める.

$\mathcal{O}^\otimes$  から  $\mathbf{Fin}_*$  への忘却関手を

$$\begin{aligned}
p: \mathcal{O}^\otimes & \longrightarrow \mathbf{Fin}_*, \\
(\langle n \rangle; x_1, \dots, x_n) & \longmapsto \langle n \rangle, \\
(\alpha; \phi_1, \dots, \phi_n) & \longmapsto \alpha
\end{aligned}$$

と定義する.

#### 命題 1.4: 色付きオペラッドと category of operators

$(1, 1)$ -圏の関手

$$p: \mathcal{O}^\otimes \longrightarrow \mathbf{Fin}_*$$

において,  $\mathcal{O}^\otimes$  がある **色付きオペラッド**  $\mathcal{O}$  の **category of operators** と圏同値になる必要十分条件は,  $p$  が条件 **(Op-ord-1)-(Op-ord-3)** を満たすことである.

**証明** [?, Proposition 2.2.II.] ■

逆の対応を作ることもできる.

### 命題 1.5: 色付きオペラッドの再構成

条件 **(Op-ord-1)-(Op-ord-3)** を充たす  $(1, 1)$ -圏の関手 (1.4.4) から次のように構成されたデータの組み  $\mathcal{O}$  は色付きオペラッドを成す:

- 対象の集まりを  $\text{Ob}(\mathcal{O}) := \text{Ob}(\mathcal{O}_{\langle 1 \rangle}^{\otimes})$  と定義する.
- $\forall x_1, \dots, x_n, y \in \text{Ob}(\mathcal{O})$  に対して, 以下の 3 つ組全体が成す集合を  $\text{Mul}_{\mathcal{O}}((x_1, \dots, x_n), y)$  と定義する.
  - $x_1, \dots, x_n$  に対して **(Op-ord-3)** を適用することにより定まる  $X \in \text{Ob}(\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^{\otimes})$
  - $x_1, \dots, x_n$  に対して **(Op-ord-3)** を適用することにより定まる  $p$ -coCartesian な射の族  $\{\hat{\rho}_i \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}}(X, x_i)_{\rho^i}\}_{1 \leq i \leq n}$
  - 【例 1.4.2】** の active な射  $\alpha_n \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle n \rangle, \langle 1 \rangle)$  およびその上の  $\mathcal{O}^{\otimes}$  の射  $F \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}}(X, y)_{\alpha_n}$
- $n$  個の多射

$$\begin{aligned} (X^1, \{\hat{\rho}_i^1\}_{1 \leq i \leq m_1}, F^1) &\in \text{Mul}_{\mathcal{O}}((x_1^1, \dots, x_{m_1}^1), y_1), \\ &\vdots \\ (X^n, \{\hat{\rho}_i^n\}_{1 \leq i \leq m_n}, F^n) &\in \text{Mul}_{\mathcal{O}}((x_1^n, \dots, x_{m_n}^n), y_n) \end{aligned}$$

と 1 つの多射  $(Y, \{\hat{\rho}_j\}_{1 \leq j \leq n}, G) \in \text{Mul}_{\mathcal{O}}((y_1, \dots, y_n), z)$  の合成

$$(X, \{\hat{\rho}_i\}_{1 \leq i \leq m_1 + \dots + m_n}, G \circ (F^1; \dots; F^n)) \in \text{Mul}_{\mathcal{O}}((x_1^1, \dots, x_{m_1}^1; \dots; x_1^n, \dots, x_{m_n}^n), z)$$

を次のように定義する:

- $X \in \text{Ob}(\mathcal{O}_{\langle m_1 + \dots + m_n \rangle}^{\otimes})$  は,  $x_1^1, \dots, x_{m_n}^n \in \text{Ob}(\mathcal{O})$  に対して **(Op-ord-3)** を適用することにより定める.
- $p$ -coCartesian な射の族  $\{\hat{\rho}_i^j \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}}(X, x_i^j)_{\rho^{i+m_1+\dots+m_{j-1}}}\}_{\substack{1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq m_j}}$  は  $x_1^1, \dots, x_{m_n}^n \in \text{Ob}(\mathcal{O})$  に対して **(Op-ord-3)** を適用することにより定める.
- $\mathcal{O}^{\otimes}$  の射  $G \circ (F^1; \dots; F^n) \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}}(X, z)_{\alpha_{m_1+\dots+m_n}}$  は以下の手順に従って構成する:

#### (STEP-1)

まず,  $1 \leq \forall j \leq n$  に対して inert な射  $\pi_j \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m_1 + \dots + m_n \rangle, \langle m_j \rangle)$  を

$$\begin{aligned} \pi_j: \langle m_1 + \dots + m_n \rangle &\longrightarrow \langle m_j \rangle, \\ k &\longmapsto \begin{cases} k - (m_1 + \dots + m_{j-1}), & 1 \leq k - (m_1 + \dots + m_{j-1}) \leq m_j \\ *, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned}$$

で定義する.

#### (STEP-2)

inert な射  $\pi_j \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m_1 + \dots + m_n \rangle, \langle m_j \rangle)$  に対して **(Op-ord-1)** を適用することにより,  $p$ -coCartesian な射  $\bar{\pi}_j \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^{\otimes}}(X, X^j)_{\pi_j}$  を取得する.

#### (STEP-3)

$$(F^1 \circ \bar{\pi}_1, \dots, F^n \circ \bar{\pi}_n) \in \prod_{j=1}^n \text{Hom}_{\mathcal{O}^\otimes}(X, y_j)_{\alpha_{m_j} \circ \pi_j}$$

に対して **(Op-ord-2)** を適用することで, 対応する

$$F \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^\otimes}(X, Y)_\pi$$

が一意的に定まる. これに  $G \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^\otimes}(Y, z)_{\alpha_n}$  を合成して

$$G \circ_\pi (F^1; \dots; F^n) := G \circ F \in \text{Hom}_{\mathcal{O}^\otimes}(X, z)_{\alpha_{m_1+\dots+m_n}}$$

と定義する. ただし,  $\pi \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m_1 + \dots + m_n \rangle, \langle n \rangle)$  は

$$\pi(k) := \begin{cases} j, & m_{j-1} < k \leq m_j \\ *, & k = * \end{cases}$$

と定義される **active な射**である<sup>a</sup>.

---

<sup>a</sup>  $1 \leq \forall j \leq n$  に対して  $\rho^j \circ \pi = \alpha_{m_j} \circ \pi_j$  が成り立つ.

**証明**

■

#### 1.4.4 $(\infty, 1)$ -オペラッドの構成

定理??のおかげで, homotopy coherent nerve

$$N_{\text{hc}}: \mathbf{Cat}_\Delta \longrightarrow \mathbf{sSet}$$

を用いて **Kan**-豊穡圏から非自明な  $(\infty, 1)$ -圏を作ることができるのだった. 同様に,  $N_{\text{hc}}$  を用いて非自明な  **$(\infty, 1)$ -オペラッド**を構成することができる.

##### 定義 1.60: simplicial colored operad

単体的色付きオペラッド (simplicial colored operad)  $\mathcal{O}$  は, 以下の 4 つのデータから成る:

- 対象<sup>a</sup> (object) の集まり

$$\text{Ob}(\mathcal{O})$$

- $\forall I \in \text{Ob}(\mathbf{Fin}), \forall \{x_i \in \text{Ob}(\mathcal{O})\}_{i \in I}, \forall y \in \text{Ob}(\mathcal{O})$  の 3 つ組に対して定まっている,  $\{x_i\}_{i \in I}$  から  $y$  へ向かう **多射** (multimorphism) が成す単体的集合

$$\text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x_i\}_{i \in I}, y) \in \text{Ob}(\mathbf{sSet})$$

- $\forall \alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}}(I, J), \forall \{x_i \in \text{Ob}(\mathcal{O})\}_{i \in I}, \{y_j \in \text{Ob}(\mathcal{O})\}_{j \in J}, \forall z \in \text{Ob}(\mathcal{O})$  の 4 つ組に対し

て定まっている, 多射の**合成** (composition map) と呼ばれる自然変換

$$\begin{aligned} \circ_\alpha: \text{Mul}_\mathcal{O}(\{y_j\}_{j \in J}, z) \times \prod_{j \in J} \text{Mul}_\mathcal{O}(\{x_i\}_{i \in \alpha^{-1}(\{j\})}, y_j) &\longrightarrow \text{Mul}_\mathcal{O}(\{x_i\}_{i \in I}, z), \\ (G, (F_j)_{j \in J}) &\longmapsto G \circ_\alpha (F_j)_{j \in J} \end{aligned}$$

- **恒等射** (identity) と呼ばれる多射の族  $\{\text{Id}_x \in \text{Mul}_\mathcal{O}(\{x\}, x)\}_{x \in \text{Ob}(\mathcal{O})}$

これらは以下の条件を充たさねばならない:

**(cOp-1)**

恒等射は合成に関して単位元として振る舞う.

**(cOp-2)**

多射の合成は結合則を充たす. i.e.  $\forall \alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}}(I, J), \forall \beta \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}}(J, K), \forall \{x_i \in \text{Ob}(\mathcal{O})\}_{i \in I}, \forall \{y_j \in \text{Ob}(\mathcal{O})\}_{j \in J}, \forall \{z_k \in \text{Ob}(\mathcal{O})\}_{k \in K}, \forall w \in \text{Ob}(\mathcal{O})$  に対して,  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  の図式

$$\begin{array}{ccccc} & & \text{Mul}_\mathcal{O}(\{z_k\}_{k \in K}, w) \times \prod_{k \in K} \text{Mul}_\mathcal{O}(\{y_j\}_{j \in \beta^{-1}(\{k\})}, z_k) \times \prod_{j \in J} \text{Mul}_\mathcal{O}(\{x_i\}_{i \in \alpha^{-1}(\{j\})}, y_j) & & \\ & \swarrow \circ_\beta \times \text{Id} & & \searrow \text{Id} \times (\circ_\alpha|_{\alpha^{-1}(\beta^{-1}(\{k\}))})_{k \in K} & \\ \text{Mul}_\mathcal{O}(\{y_j\}_{j \in J}, w) \times \prod_{j \in J} \text{Mul}_\mathcal{O}(\{x_i\}_{i \in \alpha^{-1}(\{j\})}, y_j) & & & & \\ & \searrow \circ_\alpha & & \swarrow \circ_{\beta \circ \alpha} & \\ & & \text{Mul}_\mathcal{O}(\{z_k\}_{k \in K}, w) \times \prod_{k \in K} \text{Mul}_\mathcal{O}(\{x_i\}_{i \in (\beta \circ \alpha)^{-1}(\{k\})}, z_k) & & \\ & & \searrow & & \\ & & \text{Mul}_\mathcal{O}(\{x_i\}_{i \in I}, z) & & \end{array}$$

は可換である.

---

<sup>a</sup> 色 (color) と呼ばれることもある.

**定義 1.61: ファイブラントな simplicial colored operad**

**Simplicial colored operad**  $\mathcal{O}$  が**ファイブラント** (fibrant) であるとは,  $\forall I \in \text{Ob}(\mathbf{Fin}), \forall \{x_i \in \text{Ob}(\mathcal{O})\}_{i \in I}, \forall y \in \text{Ob}(\mathcal{O})$  に対して,  $\text{Mul}_\mathcal{O}(\{x_i\}_{i \in I}, y) \in \text{Ob}(\mathbf{Kan})$  であることを言う.

次の構成は定義 1.59 とほぼ同様である.

**定義 1.62: Simplicial category of operators**

いま, **simplicial colored operad**  $\mathcal{O}$  が与えられたとする. このとき **category of operators** と呼ばれる単体的豊穡圏  $\mathcal{O}^\otimes$  を次のように定義する:

- 2 つ組  $(\langle n \rangle; x_1, \dots, x_n) \in \text{Ob}(\mathbf{Fin}_*) \times \text{Ob}(\mathcal{O})$  を対象に持つ.

- $\forall (\langle m \rangle; x_1, \dots, x_m), (\langle n \rangle; y_1, \dots, y_n) \in \text{Ob}(\mathcal{O}^\otimes)$  に対して, Hom 対象を

$$\begin{aligned} & \text{Hom}_{\mathcal{O}^\otimes} \left( (\langle m \rangle; x_1, \dots, x_m), (\langle n \rangle; y_1, \dots, y_n) \right) \\ &:= \coprod_{\alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)} \prod_{j=1}^n \text{Mul}_{\mathcal{O}}(\{x_i\}_{i \in \alpha^{-1}(\{j\})}, y_j) \in \text{Ob}(\mathbf{sSet}) \end{aligned}$$

と定義する.

- 射の合成は,  $\mathbf{Fin}_*$  における射の合成および  $\mathcal{O}$  における多射の合成によって定める.

$\mathcal{O}^\otimes$  から  $\mathbf{Fin}_*$  への忘却関手を

$$\begin{aligned} p: \mathcal{O}^\otimes &\longrightarrow \mathbf{Fin}_*, \\ (\langle n \rangle; x_1, \dots, x_n) &\longmapsto \langle n \rangle, \\ (\alpha; \phi_1, \dots, \phi_n) &\longmapsto \alpha \end{aligned}$$

と定義する.

#### 命題 1.6: Operadic nerve

ファイブラントな **simplicial colored operad**  $\mathcal{O}$  に対して, その **simplicial category of operators**  $\mathcal{O}^\otimes \longrightarrow \mathbf{Fin}_*$  に homotopy coherent nerve を作用させて得られる  $(\infty, 1)$ -圏の関手

$$p: N_{\text{hc}}(\mathcal{O}^\otimes) \longrightarrow N(\mathbf{Fin}_*)$$

は  **$(\infty, 1)$ -オペラッド** である.

証明

#### 命題 1.7:

忘却関手

$$\text{forget}: \mathbf{Op}_{(\infty, 1)} \longrightarrow \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/N(\mathbf{Fin}_*)}$$

は, **極限** を生成する (creates limits). i.e. 任意の小さな  $(\infty, 1)$ -圏の図式  $D: \mathcal{K} \longrightarrow \mathbf{Op}_{(\infty, 1)}$  に対して,  $\mathcal{K} \xrightarrow{D} \mathbf{Op}_{(\infty, 1)} \xrightarrow{\text{forget}} \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/N(\mathbf{Fin}_*)}$  が **極限**  $(p: \mathcal{O} \longrightarrow N(\mathbf{Fin}_*)) \in (\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/N(\mathbf{Fin}_*)})_0$  を持つ<sup>a</sup>ならば,  $p$  は  **$(\infty, 1)$ -オペラッド** の構造を持ち, かつそれが  $D$  の極限と一致する. [?, Lemma 1.12.]

<sup>a</sup> 正確に言うと, 極限  $\lim_{\mathcal{K}}(\text{forget} \circ D) \in \text{Hom}_{\text{forget} \circ D}(\mathcal{K}^\triangleleft, \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/N(\mathbf{Fin}_*)})$  のコーンポイントのことを  $p: \mathcal{O} \longrightarrow N(\mathbf{Fin}_*)$  と書いている.

証明 忘却関手を  $F: \mathbf{Op}_{(\infty, 1)} \longrightarrow \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/N(\mathbf{Fin}_*)}$  と略記する. 小さな  $(\infty, 1)$ -圏の図式  $D: \mathcal{K} \longrightarrow \mathbf{Op}_{(\infty, 1)}$  であって,  $\mathcal{K} \xrightarrow{D} \mathbf{Op}_{(\infty, 1)} \xrightarrow{F} \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/N(\mathbf{Fin}_*)}$  が **極限**  $\lim_{\mathcal{K}}(F \circ D) \in \text{Hom}_{F \circ D}(\mathcal{K}^\triangleleft, \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/N(\mathbf{Fin}_*)})$  を持つものを 1 つ固定する.



$\forall k \in \mathcal{K}_0$  に対して  $D_{[0]}(k) =: (p_k: \mathcal{O}_k^\otimes \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)) \in (\mathbf{Op}_{(\infty, 1)})_0$  とおく. さらに,  $\mathcal{K} \xrightarrow{\lim_{\mathcal{K}} (F \circ D)} \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/\mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)}$  のコーンポイント  $p: \mathcal{O} \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  と書き, コーンポイントと  $D_{[0]}(k)$  を繋ぐ  $\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/\mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)}$  の 1-射を

$$\sigma_k := \lim_{\mathcal{K}} (F \circ D)_{[1]}|_{\Delta_0^0 \times \mathcal{K}_0} (\{0\} \rightarrow k) \in \text{Map}_{\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/\mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)}}(p, p_k)_0$$

と書く. (1.2.2) から, これは  $\mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}$  において

$$\sigma_k = \begin{array}{ccc} \bullet & \xrightarrow{\quad} & \bullet \\ \sigma_k \swarrow & \triangle & \searrow \sigma_k \\ & \bullet & \end{array} \begin{array}{l} \mathcal{O} \quad \mathcal{O}_k^\otimes \\ \sigma_k \\ \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*) \end{array} \in \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}^2$$

と図示できる. 故に,  $f_k := \partial_2^2(\sigma_k) \in (\mathcal{F}\mathbf{un}(\mathcal{O}, \mathcal{O}_k^\otimes))_0 \subset \text{Hom}_{\mathbf{sSet}}(\mathcal{O}, \mathcal{O}_k^\otimes)$  とおくと便利である.

以下で  $p$  が  $(\infty, 1)$ -オペラッドであることを示す.

### (Op-1)

勝手な inert な射  $\alpha \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle m \rangle, \langle n \rangle)$  および  $x \in (\mathcal{O}_{\langle m \rangle})_0$  を 1 つ固定する. このとき,  $\mathcal{O}$  における  $\alpha$  の  $p$ -coCartesian lift 全体が成す空間

$$\text{Map}_{\mathcal{O}}^{\text{coCart}}(x, -)_\alpha \subset \mathcal{F}\mathbf{un}(\Delta^1, \mathcal{O})$$

を構成しよう.

まず,  $(\infty, 1)$ -圏の関手

$$\text{coCart}: \mathcal{K} \xrightarrow{D} \mathbf{Op}_{(\infty, 1)} \xrightarrow{F} \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)/\mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)} \longrightarrow \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)}$$

を,  $k \in \mathcal{K}_0$  の行き先が  $(1, 1)$ -圏  $\mathbf{sSet}$  の引き戻し

$$\begin{array}{ccccc} & & \{\alpha\} & \xleftarrow{\quad} & \text{Map}_{\mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)}(\langle m \rangle, \langle n \rangle) \\ & & \uparrow & & \uparrow p_k \\ \text{coCart}_{[0]}(k) & \longrightarrow & \mathcal{F}\mathbf{un}^{\text{coCart}}(\Delta^1, \mathcal{O}_k^\otimes)_\alpha & \longrightarrow & \mathcal{F}\mathbf{un}^{\text{coCart}}(\Delta^1, \mathcal{O}_k^\otimes) \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \{x\} & \xleftarrow{f_k} & \mathcal{F}\mathbf{un}^{\text{coCart}}(\{0\}, \mathcal{O}_k^\otimes)_\alpha = \mathcal{O}_k^\otimes_{\langle m \rangle} & \longrightarrow & \{\langle m \rangle\} \\ & & \downarrow & & \downarrow \\ & & \mathcal{O}_k^\otimes & \xrightarrow{p_k} & \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*) \end{array}$$

となるように構成する. 特に  $(\infty, 1)$ -圏同値

$$\{O\} \times_{\mathcal{O}_{\langle m \rangle}} \mathcal{F}\mathbf{un}(\Delta^1, \mathcal{O})_\alpha \xrightarrow{\cong} \lim_{k \in \mathcal{K}} (\{x\} \times_{\mathcal{O}_k^\otimes_{\langle m \rangle}} \mathcal{F}\mathbf{un}(\Delta^1, \mathcal{O}_k^\otimes)_\alpha)$$

が存在するので,

$$\text{Map}_{\mathcal{O}}^{\text{coCart}}(x, -)_\alpha := \lim_{\mathcal{K}} (\mathcal{K} \xrightarrow{\text{coCart}} \mathbf{Cat}_{(\infty, 1)})$$

と定義する．定義から明らかに  $f \in (\text{Map}_{\mathcal{O}}^{\text{coCart}}(x, -)_{\alpha})_0 \subset \mathcal{O}_1$  は  $p$ -coCartesian である．

(Op-2)

極限は有限積と交換するので明らか．

(Op-3)

補題 1.12 より,  $(\infty, 1)$ -圏同値

$$\mathcal{O}_{\langle n \rangle} \xrightarrow{\simeq} (\mathcal{O}_{\langle 1 \rangle})^{\times n}$$

を示せば良いが, これも極限が有限積と交換するので明らかである．

■

### 1.4.5 $\otimes$ -sifted cocompleteness

$p: \mathcal{V}^{\otimes} \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  を対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -圏とする．このとき,  $\forall n \geq 1$  に対して  $n$ -fold テンソル積と呼ばれる  $(\infty, 1)$ -圏の関手が

$$\otimes: \mathcal{V}^{\times n} \xleftarrow{\simeq} \mathcal{V}_{\langle n \rangle}^{\otimes} \xrightarrow{\alpha_{n!}} \mathcal{V}$$

のようにして up to homotopy で定まる<sup>\*31</sup>．ただし,  $\mathcal{V}^{\times n} \xleftarrow{\simeq} \mathcal{V}_{\langle n \rangle}^{\otimes}$  は条件 (Segal) に登場したホモトピー同値 (1.4.2) であり,  $\mathcal{V}_{\langle n \rangle}^{\otimes} \xrightarrow{\alpha_{n!}} \mathcal{V}$  というのは active な射  $\alpha_n \in \text{Hom}_{\mathbf{Fin}_*}(\langle n \rangle, \langle 1 \rangle)$  が誘導する<sup>\*32</sup>  $(\infty, 1)$ -圏の関手である．

#### 定義 1.63: sifted な $(\infty, 1)$ -圏

$(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{K}$  が sifted であるとは, 以下の 2 条件を満たすことを言う：

(sifted-1)  $\mathcal{K} \neq \emptyset$

(sifted-2) 対角関手  $\text{diag}: \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{K} \times \mathcal{K}$  が cofinal である． i.e. 任意の右ファイブレーション  $q: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{K} \times \mathcal{K}$  に対して,  $\text{diag}$  の前合成

$$\text{diag}^*: \mathcal{F}\mathbf{un}_{/(\mathcal{K} \times \mathcal{K})}(\mathcal{K} \times \mathcal{K}, \mathcal{C}) \rightarrow \mathcal{F}\mathbf{un}_{/(\mathcal{K} \times \mathcal{K})}(\mathcal{K}, \mathcal{C})$$

がホモトピー同値である．

#### 定義 1.64: sifted $(\infty, 1)$ -colimit

$(\infty, 1)$ -圏の colimit  $\text{colim}_{\mathcal{K}}(\mathcal{K} \xrightarrow{D} \mathcal{C})$  が sifted であるとは, 図式  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{K}$  が sifted であることを言う．

<sup>\*31</sup> Undelying  $(\infty, 1)$ -category  $\mathcal{V}$  を  $\mathcal{V} := \mathcal{V}_{\langle 1 \rangle}^{\otimes}$  と定義したのだった．

<sup>\*32</sup> 補題 1.12 で  $\rho^i$  の  $p$ -coCartesian lift が関手  $\mathcal{O}_{\langle n \rangle}^{\otimes} \rightarrow \mathcal{O}$  を誘導したのと同じ方法である．

#### 定義 1.65: $\otimes$ -sifted cocomplete

- 対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -圏  $p: \mathcal{V}^\otimes \longrightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$
- 小さな  $(\infty, 1)$ -圏  $\mathcal{K}$

を与える.  $\mathcal{V}^\otimes$  の対称モノイダル構造が形状  $\mathcal{K}$  の colimit の上に分布する (distributes over  $\mathcal{K}$ -shaped colimits) とは,  $\forall x \in \mathcal{V}_0$  に対して

$$x \otimes (-): \mathcal{V} \cong \Delta^0 \times \mathcal{V} \xrightarrow{x \times \mathrm{Id}_{\mathcal{V}}} \mathcal{V} \times \mathcal{V} \xrightarrow{\otimes} \mathcal{V}$$

が, 形状  $\mathcal{K}$  の任意の colimit を持つ  $(\infty, 1)$ -圏の関手  $D: \mathcal{K} \longrightarrow \mathcal{V}$  と

$$x \otimes (\mathrm{colim}_{\mathcal{K}} D) = \mathrm{colim}_{\mathcal{K}} (x \otimes D)$$

を充たすことを言う.

対称モノイダル  $(\infty, 1)$ -圏  $p: \mathcal{V}^\otimes \longrightarrow \mathbf{N}(\mathbf{Fin}_*)$  が  $\otimes$ -sifted cocomplete であるとは, それが sifted-colimit を持ち, かつ  $\mathcal{V}$  の対称モノイダル構造が sifted-colimit の上に分布することを言う.

#### 1.4.6 デカルト / 余デカルト対称モノイダル構造

#### 1.4.7 $\mathbb{E}_n$ -オペラッド

### 1.5 Stratified Disk algebras