前層と層

赤澤涼 *

2017 年 4 月

目次

1 前層と層

層とは, 関数などの局所的な挙動を, 大域的な挙動と結びつける枠組みのひとつである. 構成を目指しているアフィンスキームも, 位相空間とその上の層の組である環付き空間の一種として定義される.

1.1 前層

定義 1.1
X を位相空間とする. このとき, 対象は X の開集合全体, 射は包含写像のみからなる圏 $\mathbf{Opn}(X)$ が定まる. 反変関手

$$\mathcal{F} \colon \mathbf{Opn}(X) \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

を X 上の集合の**前層** (presheaf) という.

上の定義で, $\mathbf{Sets}$ を, 環の圏 $\mathbf{Ring}$ やアーベル群の圏 $\mathbf{Ab}$ などに取り替えれば, それぞれ環の前層, アーベル群の前層, などが定義される.

「反変関手である」という条件を書き下せば, 次のようになる. $\mathcal{F}$ が X 上の前層のとき, $\mathcal{F}$ は以下の 2 つのデータから成る:

(a) X の任意の開集合 U に対し, 集合 (環, アーベル群, $\ldots$) $\mathcal{F}(U)$.
(b) X の任意の開集合の包含 $U \subset V$ に対し, 写像 (環準同型, 群準同型, $\ldots$) $\rho_U^V \colon \mathcal{F}(V) \longrightarrow \mathcal{F}(U)$.

さらに, ρ_U^V は以下を満たす:

---

* `http://www.rakazawa.com/`

1. 任意の $U \subset U$ に対し, $\rho^U_U = \mathrm{id}_{\mathcal{F}(U)}$.
2. 任意の X の開集合の包含 $U \subset V \subset W \subset X$ に対し, $\rho^W_U = \rho^V_U \circ \rho^W_V$.

ρ^V_U を, V から U への**制限** (restriction) といい, $f \in \mathcal{F}(V)$ について, $\rho^V_U(f)$ のことを $f|_U$ とも書きあらわす.

1.2　加群の前層

$\mathcal{O}$ を位相空間 X 上の環の前層, $\mathcal{F}$ を X 上のアーベル群の前層とする. このとき, カルテジアン積 $\mathcal{O} \times \mathcal{F}$ を, 開集合 $U \subset X$ に対してはカルテジアン積 $\mathcal{O}(U) \times \mathcal{F}(U)$ を, 包含 $U \subset V$ に対しては制限 $\mathcal{O}(V) \longrightarrow \mathcal{O}(U)$ と $\mathcal{F}(V) \longrightarrow \mathcal{F}(U)$ とのカルテジアン積を対応させることによって定義する. このとき, 演算 $\mathcal{O} \times \mathcal{F} \longrightarrow \mathcal{F}$ を関手の射としてみなす. すなわちこの射は写像 $\mathcal{O}(U) \times \mathcal{F}(U) \longrightarrow \mathcal{F}(U)$ からなり, この写像はそれぞれの制限と可換である.

定義 1.2
上の状況のとき, X 上のアーベル群の前層 $\mathcal{F}$ と, 演算 $\mu\colon \mathcal{O} \times \mathcal{F} \longrightarrow \mathcal{F}$ であって任意の開集合 $U \subset X$ に対し $\mu(U)\colon \mathcal{O}(U) \times \mathcal{F}(U) \longrightarrow \mathcal{F}(U)$ が $\mathcal{F}(U)$ に $\mathcal{O}(U)$ 加群の構造を定めるようなものとの組を $\mathcal{O}$ 加群 ($\mathcal{O}$-module) という.

1.3　層

層は, 前層のうち貼り合わせに関してよい条件を満たすようなものを指す.

定義 1.3
位相空間 X 上の前層 $\mathcal{F}$ が**層** (sheaf) であるとは, 任意の開集合 $U \subset X$ と任意の開被覆 $U = \bigcup_{\lambda \in \Lambda} U_\lambda$ について, 以下の条件を満たすときにいう:

1. $f, g \in \mathcal{F}(U)$ が, 任意の $\lambda \in \Lambda$ に対し, $f|_{U_\lambda} = g|_{U_\lambda}$ を満たすならば $f = g$.
2. 各 $\lambda \in \Lambda$ に対して, $f_\lambda \in \mathcal{F}(U)$ が存在し, 任意の $\lambda, \lambda' \in \Lambda$ について, $f_\lambda|_{U_\lambda \cap U_{\lambda'}} = f_{\lambda'}|_{U_\lambda \cap U_{\lambda'}}$ を満たすとき, $f \in \mathcal{F}(U)$ が存在し, 任意の $\lambda \in \Lambda$ について, $f|_{U_\lambda} = f_\lambda$ を満たす.

条件 1. から, 条件 2. の f は一意である.

2　帰納極限と射影極限

帰納極限と射影極限を定義する. 帰納極限は直後の節で, 層の茎を定義する際に用いられる.

2.1　帰納極限

以下, 添字集合 I には半順序が入っていると仮定する. すなわち, I には二項関係 $\leq$ が備わっており,

1. 任意の $i \in I$ に対し, $i \leq i$,

2. 任意の $i, j, k \in I$ に対し, $i \leq j$ かつ $j \leq k$ ならば $i \leq k$,

を満たす. また $I \neq \emptyset$ であることと, 有向 (directed) であること, すなわち任意の $i, j \in I$ について, $k \in I$ が存在し, $i \leq k$ かつ $j \leq k$ であること, も仮定する.

$(G_i)_{i \in I}$ を集合 (群, 環, 加群, etc.) または圏 $\mathcal{C}$ の対象の族とする. $i \leq j$ について, G_i と G_j の間には $\mathcal{C}$ の射 $f_{ij}\colon G_i \longrightarrow G_j$ が定まっており, 以下を満たすとする:

(a)　任意の $i \in I$ に対し, $f_{ii} = \mathrm{id}$,

(b)　I の任意の元 $i \leq j \leq k$ に対し, $f_{ik} = f_{jk} \circ f_{ij}$.

このとき $(G_i)_{i \in I}$ と射 f_{ij} たちを合わせて**帰納系** (inductive system) といい, $(G_i, f_{ij})_{i,j \in I}$ と表す.

定義 2.1

$(G_i, f_{ij})_{i,j \in I}$ を, 圏 $\mathcal{C}$ の対象の帰納系とする. G を $\mathcal{C}$ の対象で, $i \in I$ に対し, $\mathcal{C}$ の射 $f_i\colon G_i \longrightarrow G$ が存在し, $i \leq j$ に対し, $f_i = f_j \circ f_{ij}$ を満たすものとする. G が帰納系 $(G_i, f_{ij})_{i,j \in I}$ の**帰納極限** (inductive limit) または**順極限** (direct limit) であるとは, 以下の普遍性を満たすこと:

- H を $\mathcal{C}$ の対象で, 任意の $i \in I$ に対し, $\mathcal{C}$ の射 $g_i\colon G_i \longrightarrow H$ が存在し, $i \leq j$ に対し, $g_i = g_j \circ f_{ij}$ を満たすものとする. このとき, $\mathcal{C}$ の射 $g\colon G \longrightarrow H$ が一意に存在し, 任意の $i \in I$ に対して, $g_i = g \circ f_i$ を満たす.

すなわち, 以下の図式が可換である:

$$
\begin{tikzcd}
G_j \arrow[dr, "f_j"] \arrow[drr, "g_j"] & & \\
& G \arrow[r, dashed, "g"] & H \\
G_i \arrow[uu, "f_{ij}"] \arrow[ur, "f_i"] \arrow[urr, "g_i"'] & &
\end{tikzcd}
.
$$

また射に関する設定が明らかなときには, $G = \varinjlim G_i$ などとも表す.

命題 2.2

集合, 群, 環, ある環上の加群の圏において, 帰納極限は存在する.

証明 集合の帰納系 $(G_i, f_{i,j})_{i,j \in I}$ から議論を始める. $\hat{G} = \coprod_{i \in I} G_i$ を非交和とし, 次のように関係を入れる. $x, y \in \hat{G}$ が $x \sim y$ であるとは, ある $i, j \in I$ について $x \in G_i$, $y \in G_j$ であり, $i, j \leq k$ である $k \in I$ が存在し, $f_{ik}(x) = f_{jk}(y)$ であるときにいう. このとき, $\sim$ は同値関係である. 実際, 明らかに反射的かつ対称的である. また, $x \in G_i$, $y \in G_j$, $z \in G_k$ を $\hat{G}$ の元で, $x \sim y$ かつ $y \sim z$ であるようなものとすると, $r \in I$ で $i, j \leq r$ を満たすものが存在し, $f_{ir}(x) = f_{jr}(y)$ である. また, $s \in I$ で $j, k \leq s$ を満たすものが存在し, $f_{js}(y) = f_{ks}(z)$

である．さらに, I が有向集合であるという仮定から, $t \in I$ で $r, s \leq t$ を満たすものが存在する．このとき,

$$f_{it}(x) = f_{rt}(f_{ir}(x)) = f_{rt}(f_{jr}(y)) = f_{jt}(y) = f_{st}(f_{js}(y)) = f_{st}(f_{ks}(z)) = f_{kt}(z)$$

であるから, $x \sim z$ である．$G = \hat{G}/\sim$ とする．自然な埋め込み $\hat{f}_i \colon G_i \hookrightarrow \hat{G}$ は, 写像 $f_i \colon G_i \longrightarrow G$ であって, $f_i = f_j \circ f_{ij}$ を満たすようなものを誘導する．この G と f_i の組が, $(G_i, f_{ij})_{i,j \in I}$ の帰納極限であることをいいたい．

そのために, H を集合とし, 任意の I の元 $i \leq j$ に対し, 写像 $g_i \colon G_i \longrightarrow H$ で $g_i = g_j \circ f_{ij}$ を満たすようなものが存在するとする．まず, 写像 $g \colon G \longrightarrow H$ が存在するとすれば一意であることを示す．$x \in G$ とし, $\hat{x} \in \hat{G}$ を選ぶ．このとき $\hat{x}$ は x の代表元, すなわち, ある $i \in I$ について $\hat{x} \in G_i$ で, $f_i(\hat{x}) = x$ であるとする．$g' \colon G \longrightarrow H$ を $g_i = g' \circ f_i$ を満たす写像とすると, $g(x) = g(f_i(\hat{x})) = (g \circ f_i)(\hat{x}) = g_i(\hat{x}) = (g' \circ f_i)(\hat{x}) = g'(f_i(\hat{x})) = g'(x)$ であるから, $g \colon G \longrightarrow H$ は存在すれば一意である．

次に, 実際に $g \colon G \longrightarrow H$ を構成する．先程と同様の条件を満たすように $x \in G$ と $\hat{x} \in \hat{G}$ を選ぶ．このとき, $g(x) := g_i(\hat{x})$ と定める．$\hat{y} \in \hat{G}$ が, x の別の代表元であるとすると, $\hat{x}$ と $\hat{y}$ は同値である．すなわち, $i, j \leq k$ を満たすような $k \in I$ が存在し, $f_{ik}(\hat{x}) = f_{jk}(\hat{y})$ である．よって,

$$g_i(\hat{x}) = g_k(f_{ik}(\hat{x})) = g_k(f_{jk}(\hat{y})) = g_j(\hat{y})$$

であり, $g \colon G \longrightarrow H$ は well-defined である．また g の構成から, $i \in I$ に対して $g_i = g \circ f_i$ を満たすことは明らかである．

次に, 群の帰納極限を構成する．環や, ある環上の加群の帰納極限は同様に構成すればよい．$(G_i, f_{ij})_{i,j \in I}$ を群の帰納系とする．ここで f_{ij} は群準同型である．帰納極限 $G = \hat{G}/\sim$ および写像 $f_i \colon G_i \longrightarrow G$ が集合の圏に存在することは, 上で既に示されている．この G に群の構造を入れたい．$x, y \in G$ とし, $\hat{x}, \hat{y} \in \hat{G}$ をその代表元とする．すなわち, ある $i, j \in I$ について, $f_i(\hat{x}) = x$, $f_j(\hat{y}) = y$ であるとする．このとき, $i, j \leq k$ を満たす $k \in I$ が存在する．ここで,

$$x \cdot y = f_k(f_{ik}(\hat{x}) \cdot f_{jk}(\hat{y}))$$

と定める．G_k の元 $\hat{x}' = f_{ik}(\hat{x})$ および $\hat{y}' = f_{jk}(\hat{y})$ は, それぞれ x と y の新たな代表元である．この積は well-defined である．実際, $r \in I$ があって, $\hat{x}'', \hat{y}'' \in G_r$ がそれぞれ x, y の代表元になっているとする．このとき $k, r \leq s$ および $k, r \leq t$ なる $s, t \in I$ が存在して, $f_{ks}(\hat{x}') = f_{rs}(\hat{x}'')$, $f_{kt}(\hat{y}') = f_{rt}(\hat{y}'')$ となっている．必要ならば s と t を, $s, t \leq t'$ なる $t' \in I$ で取り替えれば, $s = t$ を仮定してもよい．$f_{ks} \colon G_k \longrightarrow G_s$ および $f_{rs} \colon G_r \longrightarrow G_s$ は群準同型なので,

$$f_{ks}(\hat{x}' \cdot \hat{y}') = f_{ks}(\hat{x}') \cdot f_{ks}(\hat{y}') = f_{rs}(\hat{x}'') \cdot f_{rt}(\hat{y}'') = f_{rs}(\hat{x}'' \cdot \hat{y}'')$$

であるから, $x \cdot y$ は well-defined である．また $\hat{x}, \hat{y} \in G_i$ に対し, $f_i(\hat{x} \cdot \hat{y}) = f_i(\hat{x}) \cdot f_i(\hat{y})$ もわかる．

次に, 上のように定めた積が G に群の構造を定めること, 従って $f_i \colon G_i \longrightarrow G$ が群準同型であることを示す．任意の $i \in I$ に対し, G_i の単位元 e_i によって代表される $e \in G$ が存在する．群準同型 f_i は単位元を単位元に写すので, $\hat{G}$ では各 G_i の単位元はすべて同値である．従って $e \in G$ は well-defined である．さらに, G の群構造は各 G_i たちの群構造から直ちに従う．実際, 有限個の G の元の集合に対して, それらを表現する元をすべて含む G_i 必ず存在する．

最後に, G が帰納極限の普遍性を満たすことを示すため, H を群, $g_i \colon G_i \longrightarrow H$ を群準同型で, $i \leq j$ なる $i, j \in I$ に対し, $g_i = g_j \circ f_{ij}$ を満たすようなものとする．このとき写像 $g \colon G \longrightarrow H$ で, $g_i = g \circ f_i$ を満たす

ものが一意に定まることはすでに示されている．さらに, g が群準同型であることを示したい．$x, y \in G$ とする．I は有向集合なので, ある $i \in I$ で, G_i が x と y の代表元 $\hat{x}$ および $\hat{y}$ を共に含むようなものが存在する．ここで,

$$g(x \cdot y) = g(f_i(\hat{x}) \cdot f_i(\hat{y})) = g(f_i(\hat{x} \cdot \hat{y})) = g_i(\hat{x} \cdot \hat{y}) = g_i(\hat{x}) \cdot g_i(\hat{y}) = g(f_i(\hat{x})) \cdot g(f_i(\hat{y})) = g(x) \cdot g(y)$$

であるので, $g \colon G \longrightarrow H$ は群準同型である． □

注意 2.3
G を群の圏における帰納極限とする．このとき, 帰納極限をとる操作と, 忘却関手

$$\mathbf{Grp} \longrightarrow \mathbf{Sets}$$

は交換する．同様に, 環の圏, ある環上の加群の圏から集合の圏への忘却関手も帰納極限と交換する．

2.2　射影極限

射影極限は帰納極限の**双対** (dual) 概念である．すなわち, 射影極限の定義の「矢印を逆にした」ものを定義とするような概念である．I を前節と同様の添字集合とする．ただし, 有向集合であること, すなわち条件「任意の $i, j \in I$ について, $k \in I$ が存在し, $i \leq k$ かつ $j \leq k$ であること」は必要でない．

$(G_i)_{i \in I}$ を集合 (群, 環, 加群, etc.) または圏 $\mathcal{C}$ の対象の族とする．$i \leq j$ について, G_i と G_j の間には $\mathcal{C}$ の射 $f_{ij} \colon G_j \longrightarrow G_i$ が定まっており, 以下を満たすとする:

(a)　任意の $i \in I$ に対し, $f_{ii} = \mathrm{id}$,

(b)　I の任意の元 $i \leq j \leq k$ に対し, $f_{ik} = f_{ij} \circ f_{jk}$.

このとき $(G_i)_{i \in I}$ と射 f_{ij} たちを合わせて**射影系** (projective system) といい, $(G_i, f_{ij})_{i,j \in I}$ と表す．

定義 2.4
$(G_i, f_{ij})_{i,j \in I}$ を, 圏 $\mathcal{C}$ の対象の射影系とする．G を $\mathcal{C}$ の対象で, $i \in I$ に対し, $\mathcal{C}$ の射 $f_i \colon G \longrightarrow G_i$ が存在し, $i \leq j$ に対し, $f_i = f_{ij} \circ f_j$ を満たすものとする．G が射影系 $(G_i, f_{ij})_{i,j \in I}$ の**射影極限** (projective limit) または**逆極限** (inverse limit) であるとは, 以下の普遍性を満たすこと:

- H を $\mathcal{C}$ の対象で, 任意の $i \in I$ に対し, $\mathcal{C}$ の射 $g_i \colon H \longrightarrow G_i$ が存在し, $i \leq j$ に対し, $g_i = f_{ij} \circ g_j$ を満たすものとする．このとき, $\mathcal{C}$ の射 $g \colon H \longrightarrow G$ が一意に存在し, 任意の $i \in I$ に対して, $g_i = f_i \circ g$ を満たす．

すなわち, 以下の図式が可換である:

$$\begin{tikzcd}
 & & G_j \arrow[dd, "f_{ij}"] \\
H \arrow[urr, "g_j"] \arrow[r, dashed, "g"] \arrow[drr, "g_i"'] & G \arrow[ur, "f_j"] \arrow[dr, "f_i"] & \\
 & & G_i.
\end{tikzcd}$$

また, 射に関する設定が明らかなときには, $G = \varprojlim G_i$ などとも表す.

命題 2.5
集合, 群, 環, ある環上の加群の圏において, 射影極限は存在する.

証明 集合の射影系 $(G_i, f_{ij})_{i,j\in I}$ から議論を始める. カルテジアン積 $\prod_{j\in I} G_j$ および自然な射影

$$p_i \colon \prod_{j\in I} G_j \longrightarrow G_i$$

を考える. 部分集合,

$$G = \left\{ (x_i)_{i\in I} \in \prod_{i\in I} G_i \;\middle|\; \text{任意の } I \text{ の元 } i \leq j \text{ に対して, } f_{ij}(x_j) = x_i \right\} \subset \prod_{i\in I} G_i$$

および, 写像,

$$\begin{array}{cccc} f_i \colon & G & \longrightarrow & G_i \\ & (x_j)_{j\in I} & \longmapsto & x_i \end{array}$$

を, 射影系 $(G_i, f_{ij})_{i,j\in I}$ の射影極限だといいたい.

G の定義から, $f_i = f_{ij} \circ f_j$ は明らか. H を集合で, 任意の $i \in I$ に対し, 写像 $g_i \colon H \longrightarrow G_i$ が存在するようなものとする. 写像,

$$\begin{array}{cccc} \tilde{g} \colon & H & \longrightarrow & \prod_{i\in I} G_i \\ & x & \longmapsto & (g_i(x))_{i\in I} \end{array}$$

が, $g_i = p_i \circ \tilde{g}$ という関係から誘導される. ここで, g_i がさらに $g_i = f_{ij} \circ g_j$ を $i \leq j$ に対して満たしていたとすると, 明らかに $\tilde{g}$ の像は G に含まれるので, $\tilde{g}$ は $g \colon G \longrightarrow H$ を一意的に誘導し, $g_i = f_i \circ g$ を満たす. 特に, G と射影 $f_i \colon G \longrightarrow G_i$ の組は, 射影系 $(G_i, f_{ij})_{i,j\in I}$ の射影極限となる.

$(G_i, f_{ij})_{i,j\in I}$ が群 (環, 加群, etc.) の射影系であるとすると, カルテジアン積 $\prod_{j\in I} G_j$ は群 (環, 加群, etc.) である. f_{ij} は群準同型であるから, G も群 (環, 加群, etc.) である. このとき, 射影 $p_i \colon \prod_{j\in I} G_j \longrightarrow G_i$ は, 準同型 $f_i \colon G \longrightarrow G_i$ へと制限でき, G と合わせて $(G_i, f_{ij})_{i,j\in I}$ の射影極限となる. □

2.3 層の茎と芽

定義 2.6
X を位相空間, $\mathcal{F}$ をその上の前層または層とする. 任意の $x \in X$ について,

$$\mathcal{F}_x = \varinjlim_{x\in U} \mathcal{F}(U)$$

とし, $\mathcal{F}$ の x における**茎** (stalk) という. ただし, U は x を含む X の開集合全体を動き, 開集合の包含関係と制限が成す帰納系の帰納極限を考えている. また, $\mathcal{F}_x$ の元 f_x を f の x における**芽** (germ) という.

補題 2.7
X を位相空間, $\mathcal{F}$ をその上の層とする. 任意の開集合 $U \subset X$ に対して,

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{F}(U) & \longrightarrow & \prod_{x \in U} \mathcal{F}_x \\ f & \longmapsto & (f_x)_{x \in U} \end{array}$$

は単射である.

証明 $f, g \in \mathcal{F}(U)$ が, 任意の $x \in U$ に対して $f_x = g_x$ であるとする. 帰納極限の条件から, 任意の $x \in U$ に対してある開集合 $x \in U_x$ が存在し, $f|_{U_x} = g|_{U_x}$ である. $\{U_x\}_{x \in U}$ は U の開被覆であるので, $\mathcal{F}$ が層であることから $f = g$ を得る. □

この補題から, 層をその茎で表す方法, すなわち**エタール空間** (étalé[*1] space) と, 切断という用語について考察することができる. これは集合として $\coprod_{x \in U} \mathcal{F}_x$ として与えられる,「茎を集めたもの」のイメージである:

$$\begin{tikzcd} \mathcal{F}(U) \arrow[r, hook] \arrow[d] & \coprod_{y \in U} \mathcal{F}_y \arrow[d, "p"] \\ \{x\} \arrow[r, hook] & X. \end{tikzcd}$$

補題 2.7 より, 開集合 $U \subset X$ について, $\mathcal{F}(U)$ の元 f は, すべての芽の族 $(f_x)_{(x \in U)}$ として特徴付けられる:

$$\begin{array}{cccc} s_f\colon & U & \longrightarrow & \{\, f_x \mid x \in U \,\} \subset \coprod_{x \in X} \mathcal{F}_x \\ & x & \longmapsto & f_x. \end{array}$$

このとき $p \circ s_f(x) = x$ であるから, s_f はエタール空間から $\mathcal{F}$ の底空間への射影 $p\colon \coprod_{x \in U} \mathcal{F}_x \longrightarrow X$ の切断であるといえる. この状況を念頭に置いて, $\mathcal{F}(U)$ の元を通常, **切断** (section) と呼ぶ.

$\mathcal{F}'$ を位相空間 X 上の前層とする. このとき, $\mathcal{F}'$ の茎 $\mathcal{F}_x$ が各点 $x \in X$ で定義される. それに伴い, エタール空間と射影 $p\colon \coprod_{x \in X} \mathcal{F}' \longrightarrow X$ が考えられる. 任意の開集合 $U \subset X$ に対して, $\mathcal{F}(U)$ を, 切断 $s\colon U \longrightarrow \coprod_{x \in X} \mathcal{F}'$ であって, U の開被覆 $U = \bigcup_{i \in I} U_i$ と $f_i \in \mathcal{F}'(U_i)$ の族 $(f_i)_{i \in I}$ に対し, 任意の $i \in I$ と $x \in U_i$ について,

$$s(x) = f_{i,x}$$

であるようなものの集合とする. 従って $\mathcal{F}(U)$ の元は $p\colon \coprod_{x \in X} \mathcal{F}' \longrightarrow X$ の切断であって, 局所的には $\mathcal{F}'(U_i)$ の元であるようなものである. この方法で $\mathcal{F}'$ に付随する層 $\mathcal{F}$ を定義することができる. 実際, $\mathcal{F}$ が層になっていることを確認することは難しくないが, 付随する層については後の節で精査する.

参考文献

[1] Masaki Kashiwara, Pierre Schapira, “*Categories and Sheaves*”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

[2] Robin Hartshorne, “*Algebraic Geometry*”, Springer, 1977.

[*1] étalé はフランス語で, “spread out” という意味らしい.

[3] Siegfried Bosch, "*Algebraic Geometry and Commutative Algebra*", Springer, 2011.
[4] Ulrich Göertz, Torsten Wedhorn, "*Algebraic Geometry I*", Vieweg + Teubner, 2010.
[5] 上野健爾, 『代数幾何』, 岩波書店, 2005.
[6] 加藤五郎, 『コホモロジーのこころ』, 岩波書店, 2003.
[7] 志甫淳, 『層とホモロジー代数』, 共立出版, 2016.