この note では Hartshorne “Algebraic Geometry” p.61 にある sheaf property (3) を Identity Axiom と呼び，同じく (4) を Gluability Axiom と呼ぶ．これらの名称は Vakil “Foundations of Algebraic Geometry” にあるものである．

Ex1.1　Constant Sheaf is Associated to Constant Presheaf.

A :: abelian group, X :: topological space とする．任意の空でない開集合 $U \subseteq X$ について $\mathcal{F}(U) = A$ とし, restriction map $\rho_{UV} : \mathcal{F}(U) \to \mathcal{F}(V)$ は id_A とする．この $\mathcal{F}$ を constant presheaf と呼ぶ．$\mathcal{F}$ に対応する sheaf を $\mathcal{F}^+$ としよう．開集合 $U \subseteq X$ に対し, $\mathcal{F}^+(U) = \{f : U \to A \mid f :: \text{continus.}\}$ を示す．

まず，明らかに

$$\mathcal{F}_P = \{\langle U, s\rangle \mid U :: \text{open in } X, s \in A\} = \{\langle X, s\rangle \mid s \in A\} \cong A$$

なので $\bigcup_{P \in U} \mathcal{F}_P \cong A$．$\mathcal{F}^+(U)$ の元 $s (= \langle U, s\rangle)$ は，以下の条件を満たすものである．

$$^\forall P \in U,\ \ ^\exists P \in V \subseteq U,\ \ ^\exists t \in \mathcal{F}(V),\ \ ^\forall Q \in V,\ \ t_P = s(Q).$$

これは t として s 自身が取れるので常に成り立つ．A に離散位相を入れているので,

$$\{f : U \to A \mid f :: \text{continus.}\} = \{f : U \to A \mid 2^A \subseteq f(\mathcal{O}_U).\} = \mathrm{Hom}(U, A) = \mathcal{F}^+(U).$$

Ex1.2　The Image/Kernel in a Sheaf/Stalk.

(a)　$(\ker\phi)_P = \ker\phi_P, (\mathrm{im}\,\phi)_P = \mathrm{im}\,\phi_P$.

$\phi : \mathcal{F} \to \mathcal{G}$ と任意の点 P について $(\ker\phi)_P = \ker\phi_P, (\mathrm{im}\,\phi)_P = \mathrm{im}\,\phi_P$ を示す．

■ker　単なる変形である．

$$\begin{aligned}
&\ker\phi_P \\
=&\{s_P \in \mathcal{F}_P \mid \phi_P(s_P) = 0.\} \\
=&\{s \in \mathcal{F}(V) \mid P \in {}^\exists V :: \text{open in } X,\ \ \phi_V(s) = 0.\} \\
=&(\{s \in \mathcal{F}(V) \mid {}^\exists V :: \text{open in } X,\ \ \phi_V(s) = 0.\})_P \\
=&(\ker\phi)_P
\end{aligned}$$

■im　途中までは ker と同様である．

$$\begin{aligned}
&\mathrm{im}\,\phi_P \\
=&\{t_P \in \mathcal{G}_P \mid {}^\exists s_P \in \mathcal{F}_P,\ \ \phi_P(s_P) = t_P.\} \\
=&\{t \in \mathcal{G}(V) \mid P \in {}^\exists V :: \text{open in } X,\ \ {}^\exists s \in \mathcal{F}(V),\ \ \phi_V(s) = t.\} \\
=&(\{t \in \mathcal{G}(V) \mid {}^\exists V :: \text{open in } X,\ \ {}^\exists s \in \mathcal{F}(V),\ \ \phi_V(s) = t.\})_P
\end{aligned}$$

最後の行の $(\dots)_P$ 内は presheaf $\mathrm{im}^{pre}\,\phi$ である．sheafification によって stalk は変わらないから，$\mathrm{im}\,\phi_P = (\mathrm{im}^{pre}\,\phi)_P = (\mathrm{im}\,\phi)_P$.

(b) ϕ :: inj/surj $\iff$ $^\forall P \in X,\ \ \phi_P$ :: inj/surj.

まず，Prop1.1 を $\phi = \mathrm{id}_{\mathcal{F}} = \mathrm{id}_{\mathcal{G}}$ の場合について適用すれば

$$\mathcal{A} = \mathcal{B} \iff {}^\forall P \in X,\ \ \mathcal{A}_P = \mathcal{B}_P$$

が言えることに注意する．これと (a) を合わせると主張が示せる．まず $\phi : \mathcal{F} \to \mathcal{G}$ :: inj について．

$$\ker \phi = 0 \iff (\ker \phi)_P = 0_P \iff \ker \phi_P = 0.$$

$\phi : \mathcal{F} \to \mathcal{G}$ :: surj についても以下の通り．

$$\operatorname{im} \phi = \mathcal{G} \iff (\operatorname{im} \phi)_P = \mathcal{G}_P \iff \operatorname{im} \phi_P = \mathcal{G}_P.$$

(c) $\mathcal{F} \xrightarrow{\phi} \mathcal{G} \xrightarrow{\psi} \mathcal{H}$ is exact $\iff$ $\mathcal{F}_P \xrightarrow{\phi_P} \mathcal{G}_P \xrightarrow{\psi_P} \mathcal{H}_P$ is exact.

示すべきは以下の命題である．

$$\operatorname{im} \phi = \ker \psi \iff \operatorname{im} \phi_P = \ker \psi_P.$$

しかしこれも Prop1.1 と (a) より明らか．

Ex1.3 Surjectivity of Morphism is Local Property.

(a) Paraphrase of Surjectivity.

$\mathcal{F}, \mathcal{G} : X \to A$, $\phi : \mathcal{F} \to \mathcal{G}$ について ϕ :: surj が以下の命題と同値であることを示す．

$$(*) \quad {}^\forall U :: \text{open in } X,\ \ {}^\forall s \in \mathcal{G}(U),\ \ \bigcup {}^\exists U_i = U,\ \ {}^\exists t_i \in \mathcal{F}(U_i),\ \ {}^\forall i,\ \ \phi(t_i) = s|_{U_i}.$$

ϕ :: surj ならば covering $\{U_i\}$ として U をとり，$\phi(t) = s$ となる t を t_i とすれば良い．

逆を示す．Ex1.2b より，任意の $P \in U$ について ϕ_P :: surj であることを示せば良い．仮定より $P \in V \subseteq U$ となる V（$(*)$ 中の U_i）が存在し，$\phi_P(t_P) = s|_V = s_P$ を満たす $t_P \in \mathcal{F}(V) \subseteq \mathcal{F}_P$ が存在する．よって ϕ_P :: surj.

(b) Give an Counterexample.

以下の morphism は surjective だが $\phi(U) : \mathcal{F}(U) \to \mathcal{G}(U)$ が surjective でない．sheaf $\mathcal{F} : \mathbb{C} - 0 \to \mathbb{C}$ を，穴あき平面 $\mathbb{C} - 0$ 全体で正則な関数全体 (Example1.0.2) とする．$\mathcal{G} : \mathbb{C} \to \mathbb{C}$ は $\mathbb{C}$ 全体で正則な関数全体とする．そして $\phi : \mathcal{F} \to \mathcal{G}$ を $f \mapsto \frac{d}{dz}(1/f)$ で定義する．（TODO）

Ex1.4 Induced Injective Sheaf Morphism.

(a) Injective Presheaf Morphism Induces Injective Sheaf Morphism.

以下は可換図式である．

$$\begin{tikzcd}
\mathcal{F}^+ \arrow[r, dashed, "\phi^+"] & \mathcal{G}^+ \\
\mathcal{F} \arrow[u] \arrow[ur] \arrow[r, "\phi"'] & \mathcal{G} \arrow[u]
\end{tikzcd}$$

これを stalk をとる関手 $\lim_{\to P\in U}$ で写すと，Prop-Def1.2 の直後に言及されている $\mathcal{F}_P = \mathcal{F}_P^+$ から，以下が得られる．

$$\begin{tikzcd} \mathcal{F}_P^+ \arrow[r, "\phi_P^+"] & \mathcal{G}_P^+ \\ \mathcal{F}_P \arrow[u, equal] \arrow[r, "\phi_P"'] \arrow[ur] & \mathcal{G}_P \arrow[u, equal] \end{tikzcd}$$

この可換図式から $\phi_P = \phi_P^+$．よって Ex1.2b から $\phi :: \text{inj} \iff \phi^+ :: \text{inj}$.

(b)　Natural Induced Map $\operatorname{im}\phi \to \mathcal{G}$ is Injective.

埋め込み写像 $\operatorname{im}^{pre}\phi \hookrightarrow \mathcal{G}$ は injective なので，ここから誘導される $\operatorname{im}\phi \to \mathcal{G}$ も injective.

Ex1.5　For Morphism of Shaves, iso=inj+surj.

$\phi : \mathcal{F} \to \mathcal{G}$ を考える．ϕ が iso であることと，任意の点 P で ϕ_P が iso であることは同値．また，ϕ が inj+surj であることと，任意の点 P で ϕ_P が inj+surj であることは同値である．これらはそれぞれ Prop1.1 と Ex1.2 から理解る．よって ϕ_P について iso=inj+surj を確かめれば必要十分.

■ϕ_P :: iso $\implies$ ϕ_P :: inj+surj.　ϕ_P :: iso ならば，

$$^\forall x_1, x_2 \in \mathcal{F}_P,\quad \phi_P(x_1) = \phi_P(x_2) \implies \phi_P^{-1} \circ \phi_P(x_1) = x_1 = x_2 = \phi_P^{-1} \circ \phi_P(x_2)$$

すなわち ϕ_P :: inj．同時に

$$^\forall y \in \mathcal{G}_P,\quad \phi_P\bigl(\phi_P^{-1}(y)\bigr) = y$$

すなわち ϕ_P :: surj.

■ϕ_P :: iso $\impliedby$ ϕ_P :: inj+surj.　まず ϕ_P :: surj から以下が成り立つ．

$$^\forall y \in \mathcal{G}_P,\quad ^\exists x \in \mathcal{F}_P,\quad \phi_P(x) = y.$$

この命題を満たす $x \in \mathcal{F}_P$ は ϕ_P :: inj からただひとつである．

$$^\forall y \in \mathcal{G}_P,\quad ^{\exists_1} x \in \mathcal{F}_P,\quad \phi_P(x) = y.$$

なので $\phi_P^{-1}(y) = x$ と定めればこれは写像になる．なお，ϕ_P でなく ϕ で議論をすると，構成した ϕ の naturality を示す必要がある．

Ex1.6　Short Exact Sequence of Sheaves.

(a)　Natural Map $q : \mathcal{F} \to \mathcal{F}/\mathcal{F}'$ Has $\operatorname{im} q = \mathcal{F}/\mathcal{F}'$ and $\ker q = \mathcal{F}'$.

quotient sheaf の定義 (p.65) より，任意の点 P について $(\mathcal{F}/\mathcal{F}')_P = \mathcal{F}_P/\mathcal{F}'_P$ [†1]．よって q から誘導される q_P は $\mathcal{F}_P \to \mathcal{F}_P/\mathcal{F}'_P$ の自然な写像である．$\operatorname{im} q_P = \mathcal{F}_P/\mathcal{F}'_P, \ker q_P = \mathcal{F}'$ となるから，Ex1.2a より主張が得られる．

[†1] これは sheafification functor $sh_X : \mathbf{PSh}(X, \mathfrak{C}) \to \mathbf{Sh}(X, \mathfrak{C})$ が forgetful functor の left adjoint functor であること，及び left adjoint functor は colimit を保つことからも得られる．

(b) If $0 \to \mathcal{F}' \xrightarrow{f} \mathcal{F} \xrightarrow{g} \mathcal{F}'' \to 0$ is Exact, ...

仮定より，$0 = \ker f, \operatorname{im} f = \ker g, \operatorname{im} g = \mathcal{F}''$．よって f は inj で，$f|^{\operatorname{im} f} : \mathcal{F}' \to \operatorname{im} f$ は surj+inj．なので Ex1.5 よりこれは iso であり，$\mathcal{F}'$ は $\operatorname{im} f \subset \mathcal{F}$ と同型である．続けて $g : \mathcal{F} \to \mathcal{F}''$ から誘導される $g_P : \mathcal{F}_P \to \mathcal{F}''_P$ を考える．定義より $\mathcal{F}_P, \mathcal{F}''_P$ は abelian group（abelian group の圏での colimit）で，g_P はその morphism．だから abelian group の準同型定理からの帰結として $\mathcal{F}_P/\ker g_P = (\mathcal{F}/\ker g)_P \cong \mathcal{F}''_P$ が得られる．Prop1.1 より $\mathcal{F}'' \cong \mathcal{F}/\ker g = \mathcal{F}/\operatorname{im} f \cong \mathcal{F}/\mathcal{F}'$.

Ex1.7 $\operatorname{im} \phi \cong \mathcal{F}/\ker \phi$, and $\operatorname{coker} \phi \cong \mathcal{G}/\operatorname{im} \phi$.

$\phi : \mathcal{F} \to \mathcal{G}$ について考える．$\operatorname{im} \phi \cong \mathcal{F}/\ker \phi$ は以下の完全列に Ex1.6b を用いて得られる．

$$0 \to \ker \phi \xrightarrow{i} \mathcal{F} \xrightarrow{\phi} \operatorname{im} \phi \to 0.$$

ただし i は埋め込み写像である．$\operatorname{coker} \phi \cong \mathcal{G}/\operatorname{im} \phi$ は同様に以下の完全列から得られる．

$$0 \to \operatorname{im} \phi \xrightarrow{\phi} \mathcal{G} \xrightarrow{q} \operatorname{coker} \phi \to 0.$$

ただし q は $q^{pre} : \mathcal{G} \to \operatorname{coker} \phi = \mathcal{G}/\operatorname{im} \phi$ から誘導される写像．これが完全列であることは次のように示される．まず Ex1.6a を用いて stalk の完全列を得る．

$$0 \to \operatorname{im} \phi_P \xrightarrow{\phi_P} \mathcal{G}_P \xrightarrow{q_P} \operatorname{coker} \phi_P = \mathcal{G}_P/\operatorname{im} \phi_P \to 0.$$

Ex1.2a,c を用いて元の列が完全であることが示される．

Ex1.8 ${}^{\forall} U \subset X,\ \ \Gamma(U, -)$ :: left exact functor

以下を $X \to A$ の sheaves がなす完全列とする．

$$0 \to \mathcal{F}' \xrightarrow{f} \mathcal{F} \xrightarrow{g} \mathcal{F}''.$$

完全列なので $0 = \ker f, \operatorname{im} f = \ker g$．$\mathcal{A} \mapsto \mathcal{A}(U)$ で定義される functor $\Gamma(U, -)$ により，この完全列は以下の列になる．

$$0 \to \mathcal{F}'(U) \xrightarrow{f_U} \mathcal{F}(U) \xrightarrow{g_U} \mathcal{F}''(U).$$

これが完全列であることは $0 = \ker f_U, \operatorname{im} f_U = \ker g_U$ と同値．

まず $\ker f$ を考えると，定義より $0 = (\ker f)(U) = \ker f_U$．よって f_U :: inj．また，$\Gamma(U, -)$ は functor だから

$$0 = \Gamma(U, g \circ f) = \Gamma(U, g) \circ \Gamma(U, f) = 0.$$

すなわち $g_U \circ f_U = 0$，$\operatorname{im} f_U \subseteq \ker g_U$．

残るは逆の包含関係である．まず $s \in \ker g_U \subseteq \mathcal{F}(U)$ を取る．Ex1.2a より，任意の $P \in U$ について $\operatorname{im} f_P = \ker g_P$．なので任意の点 P について $s_P \in \operatorname{im} f_P = \ker g_P$ であり，$f_P(t_P) = s_P$ となる $t_P \in \mathcal{F}'_P$ が存在する．そこで s_P, t_P の代表元 $\langle V_P, s|_{V_P} \rangle, \langle V_P, t^P|_{V_P} \rangle$ をとると $f_{V_P}(t^P|_{V_P}) = s|_{V_P}$ となる．同様に別の点 $Q \in U, t_Q = \langle V_Q, t^Q|_{V_Q} \rangle$ をとると，$W_{PQ} := V_P \cap V_Q$ について

$$f_{W_{PQ}}(t^P|_{W_{PQ}}) = s|_{W_{PQ}} = f_{W_{PQ}}(t^Q|_{W_{PQ}}).$$

$0 = (\ker f)(W_{PQ}) = \ker f_{W_{PQ}}$ より $f_{W_{PQ}}$ は inj．したがって $t^P|_{W_{PQ}} = t^Q|_{W_{PQ}}$ が得られる．$(P \in$ $)$ W_{PQ} は U を被覆するから，Gluability Axiom (p.61 の sheaf property (4)) より，$t|_{W_{PQ}} = t^P|_{W_{PQ}} = t^Q|_{W_{PQ}}$ なる $t \in \mathcal{F}'(U)$ が存在する．morphism と restriction の naturality により，

$$f_U(t)|_{W_{PQ}} = f_{W_PQ}(t|_{W_{PQ}}) = f_{W_{PQ}}(t^P|_{W_{PQ}}) = s|_{W_{PQ}}$$

となるから，Identity Axiom (p.61 の sheaf property (3))) より $f_U(t) = s$．以上より $\operatorname{im} f_U \supseteq \ker g_U$．

Ex1.9　Direct Sum.

sheaves $\mathcal{F}, \mathcal{G} : X \to \mathfrak{C}$ について，$\mathcal{F} \oplus \mathcal{G}$ を以下で定める．

$$\mathcal{F} \oplus \mathcal{G} : U \mapsto \mathcal{F}(U) \oplus \mathcal{G}(U).$$

ただし U :: open in X．これが presheaf であることは自明なので，sheaf であることを示す．以下，U :: open in X とその開被覆 $\{U_i\}$ を固定する．

■$\mathcal{F} \oplus \mathcal{G}$ Satisfies Identity Axiom.　$s \oplus t \in \mathcal{F}(U) \oplus \mathcal{G}(U)$ が $(s \oplus t)|_{U_i} = 0 \oplus 0 = 0$ を満たすとする．この仮定を論理式で書下すと，

$$^\forall P \in U_i,\quad (s \oplus t)(P) = s(P) \oplus t(P) = 0 \oplus 0.$$

abelian group の coproduct は product と同型だから，これは以下のように書き換えられる．

$$^\forall P \in U_i,\quad s(P) = 0 \wedge t(P) = 0.$$

これは $s|_{U_i} = t|_{U_i} = 0$ と同値．なので $\mathcal{F}, \mathcal{G}$ は sheaf であることから $s = t = 0$．すなわち $s \oplus t = 0$．

■$\mathcal{F} \oplus \mathcal{G}$ Satisfies Gluability Axiom.　$s_i \oplus t_i \in \mathcal{F}(U_i) \oplus \mathcal{G}(U_i)$ が存在し，以下を満たすとする．

$$^\forall i, j,\quad (s_i \oplus t_i)|_{U_i \cap U_j} = (s_j \oplus t_j)|_{U_i \cap U_j}.$$

前段落と同様に書き換えて，以下が得られる．

$$^\forall i, j,\quad s_i|_{U_i \cap U_j} = s_j|_{U_i \cap U_j} \wedge t_i|_{U_i \cap U_j} = t_j|_{U_i \cap U_j}.$$

$\mathcal{F}, \mathcal{G}$ は sheaf であることから，以下を満たす $s \in \mathcal{F}(U_i), t \in \mathcal{G}(U_i)$ が存在する．

$$^\forall i,\quad s|_{U_i} = s_i \wedge t|_{U_i} = t_i.$$

この s, t について $(s \oplus t)|_{U_i} = (s|_{U_i}) \oplus (t|_{U_i}) = s_i \oplus t_i$．

■$\mathcal{F} \oplus \mathcal{G}$ is Coproduct in $\mathbf{Sh}(X)$.　以下の図式を考える．

$$\begin{tikzcd}
& \mathcal{F} \oplus \mathcal{G} \arrow[dd, dashed, "\exists_1 {[f,g]}"] & \\
\mathcal{F} \arrow[ur, "i"] \arrow[dr, "\forall f"'] & & \mathcal{G} \arrow[ul, "j"'] \arrow[dl, "\forall g"] \\
& \forall \mathcal{Z} &
\end{tikzcd}$$

ただし Z, f, g は任意で，i, j はそれぞれ $s \mapsto s \oplus 0, t \mapsto 0 \oplus t$ とする．すると $\mathcal{F}, \mathcal{G}$ から $\mathcal{Z}$ へ至る二つのパスをたどることで，この図式を可換にする $[f, g]$ は以下のものしか無い事が理解る．

$$[f, g] : s \oplus t \mapsto f(s) + g(t).$$

f, g は morphism of abelian group で $f(s), g(t)$ は element of abelian group．だから，例えば $\mathcal{F} \to \mathcal{Z}$ の二つのパスは次の計算の通り可換になる．

$$[f, g] \circ i : s \mapsto s \oplus 0 \mapsto f(s) + g(0) = f(s) \leftarrow\!\shortmid s : f$$

よって $\mathcal{F} \oplus \mathcal{G}$ は coproduct.

Ex1.10 Direct Limit.

Ex1.8 の functor $\Gamma(-,-)$，sheafification functor sh_X と abelian category の direct limit $\lim_{\to i}$ を用いて，$\lim_{\to i} \mathcal{F}_i$ を以下で定める．

$$\Gamma(-, \lim_{\to i} \mathcal{F}_i) = sh_X \lim_{\to i} \Gamma(-, \mathcal{F}_i).$$

ただし $\{\mathcal{F}_i\}_{i \in I}$ は direct system である．これが $\mathbf{Sh}(X)$ の direct limit であることを示す．

まず，$\mathcal{L} : U \mapsto \lim_{\to i} \mathcal{F}_i(U)$ とおく．これは明らかに $\mathbf{PSh}(X)$ における direct limit で[†2]，$\mathcal{L}^+ = \lim_{\to i} \mathcal{F}_i$ を満たす．よって sheafification functor sh_X が direct limit を保つことを見れば良い．次の可換図式は $\mathcal{L}$ の UMP を表す．

$$\begin{tikzcd}
\mathcal{L} \arrow[drr, dashed, "\bar{f}_i"] & & \\
& \mathcal{F}_i \arrow[ul] \arrow[r, "f_i"'] & \mathcal{G}
\end{tikzcd}$$

ただし $\mathcal{G}, f_i$ は任意．sheafification の UMP を $\bar{f}_i : \mathcal{L} \to \mathcal{G}$ に用いて，次の可換図式が得られる．

$$\begin{tikzcd}
\mathcal{L} \arrow[rrr, "\theta"] \arrow[drr, dashed, "\bar{f}_i"] & & & \mathcal{L}^+ \arrow[dll] \arrow[dl, dashed, "\bar{\bar{f}}_i"] \\
& \mathcal{F}_i \arrow[ul] \arrow[r, "f_i"'] & \mathcal{G} &
\end{tikzcd}$$

よって $f_i : \mathcal{F}_i \to \mathcal{G}$ に対して一意に $\bar{\bar{f}}_i : \mathcal{L}^+ \to \mathcal{G}$ が存在する．これで $\mathcal{L}^+ = \lim_{\to i} \mathcal{F}_i$ の UMP が示せた．$\mathcal{F}_i \to \mathcal{F}_j$ との可換性は morphism を結合すれば容易に分かる．

(i) Another Proof.

sheafification functor $sh_X : \mathbf{PSh}(X) \to \mathbf{Sh}(X)$ が Forgetful Functor $F : \mathbf{Sh}(X) \to \mathbf{PSh}(X)$ の left adjoint functor であることを用いる．これは R.Vakil "Foundations of Algebraic Geometry" Part I, 2.4.L などにある事実である．direct limit が colimit であることと，"Left Adjoint Preserves Colimits" より，

$$sh_X \lim_{\to i} \mathcal{F}_i \cong \lim_{\to i} sh_X \mathcal{F}_i \cong \lim_{\to i} \mathcal{F}_i.$$

Ex1.11 Pre-Direct Limit on Noetherian Top.Sp. is Already a Sheaf.

sheaves $\{\mathcal{F}^i\}$ with morphisms $f^{ij} : \mathcal{F}^i \to \mathcal{F}^j$ :: direct system とし，$\mathbf{PSh}(X)$ における direct limit を $\mathcal{L}$ で書く．X :: noetherian topological space であるとき，$\mathcal{L}$ が予め sheaf であることを示す．以下，U :: open in X と開被覆 $\{U_\lambda\}$ を任意にとり，固定する．

(TODO: 集合 $\{U_\lambda\}$ から極大元を集めると有限被覆が出来る．そして $\mathcal{F}^i(U_1) \oplus \cdots \oplus \mathcal{F}^i(U_n)$ として，これが direct limit の UMP を満たすことを見る．)

[†2] $\mathbf{PSh}(X)$ が direct limit を持つことは abelian category $\mathfrak{C}$ が direct limit を持つことによる．

■Identity Axiom. $s \in \mathcal{L}(U)$ が任意の λ について $s|_{U_\lambda} = 0$ を満たすとしよう．以下の可換図式を見よ．

$$\begin{tikzcd}
\mathcal{L}(U) \arrow[r, dashed, two heads, "\mathrm{res}_U^{U_\lambda}"] & \mathcal{L}(U_\lambda) \\
\mathcal{F}^i(U) \arrow[u] \arrow[r, "f_U^{ij}"'] \arrow[ur, bend left] & \mathcal{F}^j(U) \arrow[u] \arrow[ul, bend right]
\end{tikzcd}$$

$\mathcal{F}^*(U)$ から $\mathcal{L}(U_\lambda), \mathcal{L}(U)$ への morphism が存在することは $\mathcal{L}$ が $\mathbf{PSh}(X)$ での direct limit であることから明らか．射 $\mathrm{res}_U^{U_\lambda}$ は epi(=surj)．したがって $s|_{U_\lambda} = 0$ より $s|_U = 0$ が得られる．

■Gulability Axiom. $s_\lambda \in \mathcal{L}(U_\lambda)$ である section の集合 $\{s_\lambda\}$ をとる．これらが任意の λ, μ について $s_\lambda|_{U_\lambda \cap U_\mu} = s_\mu|_{U_\lambda \cap U_\mu}$ を満たすとしよう．

Ex1.12 Inverse Limit.

sheaves $\{\mathcal{F}^i\}$ with morphisms $f^{ij} : \mathcal{F}^i \to \mathcal{F}^j$ :: inverse system とし，$\mathbf{PSh}(X)$ における inverse limit $U \mapsto \lim_{i\leftarrow} \mathcal{F}^i(U)$ を $\mathcal{L}$ で書く．このとき $\mathcal{L}$ は $\mathbf{Sh}(X)$ においても inverse limit であることを示す．

sheafification functor を $Sh : \mathbf{PSh}(X) \to \mathbf{Sh}(X)$, forgetful functor を $Fgt : \mathbf{Sh}(X) \to \mathbf{PSh}(X)$ で書く．Fgt は Sh の right adjoint functor($Sh \dashv Fgt$.) なので，$\lim_{i\leftarrow}$ と可換[†3]．inverse limit は limit なので以下が得られる．

$$\lim_{i\leftarrow} Fgt\mathcal{F}^i \cong Fgt \lim_{i\leftarrow} \mathcal{F}^i \cong \lim_{i\leftarrow} \mathcal{F}^i.$$

最後の $\cong$ は F が forgetful functor，すなわち object を変化させないことによる．したがって $\mathbf{PSh}(X)$ における inverse limit は $\mathbf{Sh}(X)$ における inverse limit と一致する．まったく同様の議論で $\mathbf{PSh}(X)$ における limit は $\mathbf{Sh}(X)$ における limit に一致する．

(i) Proof of $Sh \dashv Fgt$.

adjoint の定義にはいくつか同値なものがあるが，ここでは Steve Awodey “Category Theory” p.214 にある Cor9.5 を用いる．

F は object を変えない埋め込み写像なので，直ちに全単射 $\tilde{\eta}_{(-)} : (-) \leftrightarrow F(-) : \tilde{\epsilon}_{(-)}$ がとれる．これに sheafification の UMP を用いると以下の可換図式が得られる．

$$\begin{tikzcd}
Sh \arrow[r, "\tilde{\eta}"] & FgtSh \\
\mathrm{id}_{\mathbf{PSh}(X)} \arrow[u, "\theta"] \arrow[ur, "\eta"']
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
ShFgt \arrow[r, dashed, "\epsilon"] & \mathrm{id}_{\mathbf{Sh}(X)} \\
Fgt \arrow[u, "\theta_{Fgt}"] \arrow[ur, "\tilde{\epsilon}"']
\end{tikzcd}$$

こうして unit $\eta : \mathrm{id}_{\mathbf{PSh}(X)} \to FgtSh$ と counit $\epsilon : ShFgt \to \mathrm{id}_{\mathbf{Sh}(X)}$ が得られる．さらに，この二つの

[†3] “Right Adjoints Preserves Limits.”

可換図式を組み合わせて，以下の可換図式が作れる．

$$\begin{tikzcd} \mathrm{id}_{\mathbf{PSh}(X)} \arrow[r, "\theta"] & Sh \end{tikzcd}$$

$$\begin{tikzcd} Fgt \arrow[rr, leftrightarrow, "\tilde{\epsilon}"] \arrow[dr, "\theta_{Fgt}"'] & & \mathrm{id}_{\mathbf{Sh}(X)} \\ & ShFgt \arrow[ur, "\epsilon"'] & \end{tikzcd}$$

さて，$\mathcal{F} \in \mathbf{PSh}(X), \mathcal{G} \in \mathbf{Sh}(X)$ と $g : Sh\mathcal{F} \to \mathcal{G}$ を任意に取る．この時の可換図式は以下の (1) である．

$$(1) \quad \begin{tikzcd} \mathcal{F} \arrow[rr, "\theta_{\mathcal{F}}"] & & Sh\mathcal{F} \arrow[d, "g"] \\ Fgt\mathcal{G} \arrow[rr, leftrightarrow, "\tilde{\epsilon}_{\mathcal{G}}"] \arrow[dr, "\theta_{Fgt\mathcal{G}}"'] & & \mathcal{G} \\ & ShFgt\mathcal{G} \arrow[ur, "\epsilon_{\mathcal{G}}"'] & \end{tikzcd}$$

$$(2) \quad \begin{tikzcd} \mathcal{F} \arrow[rr, "\theta_{\mathcal{F}}"] \arrow[d, "\bar{g}"] \arrow[ddr, squiggly, bend right] & & Sh\mathcal{F} \arrow[d, "g"] \\ Fgt\mathcal{G} \arrow[rr, leftrightarrow, "\tilde{\epsilon}_{\mathcal{G}}"] \arrow[dr, "\theta_{Fgt\mathcal{G}}"'] & & \mathcal{G} \\ & ShFgt\mathcal{G} \arrow[ur, "\epsilon_{\mathcal{G}}"'] & \end{tikzcd}$$

$$(3) \quad \begin{tikzcd} \mathcal{F} \arrow[rr, "\theta_{\mathcal{F}}"] \arrow[d, "\bar{g}"] & & Sh\mathcal{F} \arrow[d, "g"] \arrow[dl, dashed, bend left=60, "Sh(\bar{g})", shift left=8ex] \\ Fgt\mathcal{G} \arrow[rr, leftrightarrow, "\tilde{\epsilon}_{\mathcal{G}}"] \arrow[dr, "\theta_{Fgt\mathcal{G}}"'] & & \mathcal{G} \\ & ShFgt\mathcal{G} \arrow[ur, "\epsilon_{\mathcal{G}}"'] & \end{tikzcd}$$

コの字型の部分をたどることで，(2) の $\bar{g} : \mathcal{F} \to Fgt\mathcal{G}$ が得られる．Ex1.4 における ϕ^+ の作り方をなぞると，$Sh(\bar{g})$ は (2) の波矢印 $\theta_{Fgt\mathcal{G}} \circ \bar{g}$ から sheafification の UMP で得られるものである．sheafification をしたあとの可換図式が (3) である．こうして $g = \epsilon_{\mathcal{G}} \circ Sh(\bar{g})$ が得られる．

Ex1.13 Espace Étalé of a Presheaf.

(i) Definition of Espace Étalé.

$\mathcal{F} \in \mathbf{PSh}(X)$ に対し，espace étalé of $\mathcal{F}$ $\mathrm{Spé}(\mathcal{F})$ を以下のように定義する．まず，集合として $\mathrm{Spé}(\mathcal{F}) = \bigsqcup_{P \in X} \mathcal{F}_P$ とおく．projection map π とその "section" $\bar{s}$ を以下で定める．まず，π は以下のもの．

$$\begin{array}{rccc} \pi : & \mathrm{Spé}(\mathcal{F}) & \to & X \\ & s \in \mathcal{F}_P & \mapsto & P. \end{array}$$

任意の U :: open in X と $s \in \mathcal{F}(U)$ に対して $\bar{s} : U \to \mathrm{Spé}(\mathcal{F})$ を以下で定める．

$$\begin{array}{rccc} \bar{s} : & U & \to & \mathrm{Spé}(\mathcal{F}) \\ & P & \mapsto & s_P. \end{array}$$

この時，$\pi \circ \bar{s} = \mathrm{id}_U$．すなわち，$\bar{s}$ は U 上で π の "section"である．そして $\mathrm{Spé}(\mathcal{F})$ に以下のような位相を入れる: 任意の U と任意の s について $\bar{s}$ が連続であるような最強の位相．これはつまり $\{\bar{s}\}$ についての終位相である．

(ii) More References for Espace Étalé.

Wikipedia の Sheaf のページ `https://www.wikiwand.com/en/Sheaf_(mathematics)#/The_.C3.A9tal.C3.A9_space_of_a_sheaf` （2017 年 3 月 30 日参照）に概略が書かれている．詳細についての

資料は以下の通り．まず，一般の espace étalé(étalé space) の categorical な定義が `https://ncatlab.org/nlab/show/etal\'e+space` にある．Étalé space の圏と sheaf の圏が圏同値であることの証明は Saunders Mac Lane, Ieke Moerdijk "Sheaves in Geometry and Logic" の §5-6, pp.83-90 にある．（この命題はこの本の p.90 Cor3 である．）同様のことが "Etale cohomology course notes" `http://math.colorado.edu/~jonathan.wise/teaching/math8174-spring-2014/notes.pdf` の 7 Etale spaces and sheaves (p.24) にあるが，この note はミスが多いしわかりにくいのでおすすめしない．

(iii) Proposition and Proof.

X 上の étalé space をとって，その連続な section 全体をとる関手を $Sec : \mathbf{Et}(X) \to \mathbf{Sh}(X)$ とする．逆に presheaf から étalé space を作る関手を $\acute{E}t : \mathbf{PSh}(X) \to \mathbf{Et}(X)$ とする．sheafification functor が $Sh = Sec\acute{E}t$ で定義できることを示す．

■Plan of Proof. 二つの写像を定める．

$$\begin{array}{cccc} \alpha : & \mathrm{id}_{\mathbf{Sh}(X)} & \to & Sec\acute{E}t \\ & s \in \mathcal{F}(U) & \mapsto & [\bar{s} : P \mapsto s_P] \\ & & & \\ \beta : & \acute{E}tSec & \to & \mathrm{id}_{\mathbf{Et}(X)} \\ & P \times [\sigma : U \to \mathrm{id}_{\mathbf{Et}(X)}] & \mapsto & \sigma(P) \end{array}$$

ただし U は任意の X の開集合で，P は U の任意の点である．この α, β が natural map かつ isomorphism であることが証明できるので，圏同値 $\mathbf{Et}(X) \simeq \mathbf{Sh}(X)$ が示せる．しかし我々の目的は sheafification の UMP であり，これには α についてさえ示せれば十分である．この証明は Saunders Mac Lane, Ieke Moerdijk "Sheaves in Geometry and Logic" pp.85-86 にある[†4]．

■α :: natural. $\mathcal{F}, \mathcal{G} \in \mathbf{PSh}(X)$ とする．

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{F} & \xrightarrow{\alpha_{\mathcal{F}}} & Sec\acute{E}t\mathcal{F} \\ \downarrow{\scriptstyle \phi} & & \downarrow{\scriptstyle Sec\acute{E}t\phi} \\ \mathcal{G} & \xrightarrow[\alpha_{\mathcal{G}}]{} & Sec\acute{E}t\mathcal{G} \end{array}$$

$Sec\acute{E}t\phi$ は次のような，section を section へ写す写像である．

$$Sec\acute{E}t\phi : [P \mapsto *_P] \mapsto [P \mapsto *_P \mapsto \phi_P(*_P)].$$

したがって $\mathcal{F} \to Sec\acute{E}t\mathcal{G}$ のどちらのパスでも $s \mapsto [P \mapsto \phi_P(s_P) = (\phi(s))_P]$ と section を section へ写す写像になる．ただし P は X の点である．これで α :: natural が示せた．

■α :: iso. まず α :: inj は Indentity Axiom から容易に示されるので略す．α :: surj の証明は長い．まず U :: open in $X, s \in (Sec\acute{E}t\mathcal{F})(U)$ を任意に取る．すると $Sec\acute{E}t$ の定義から，以下が成り立つ．

$$^\forall P \in U, \quad (P \in)^\exists V :: \text{open in } U, \quad ^\exists\sigma \in \mathcal{F}(V), \quad s(P) = \sigma_P.$$

[†4] この本では α は η と書かれている．また，この本でいう cross-section は $\pi \circ \sigma = \mathrm{id}_U$ なる section のこと．$\dot{s}$ は $\bar{s}$ のことである．その他，germ の記法などがだいぶ違うので注意．

$\acute{E}t\mathcal{F}$ の位相は像位相であり，かつ $\bar{\sigma}$ は明らかに単射．なので $\alpha(\sigma)(V) = \bar{\sigma}(V)$ は open である[†5]．しかも s :: continuous だから，$s(S) \subseteq \alpha(\sigma)(V)$ なる $(P \in)S(\subseteq V)$ :: open が存在する[†6]．このとき σ のとり方から $s|_S = \alpha(\sigma)|_S$ となる．点 P を様々に取ることで，S で U を被覆できることがわかる．$\sigma\&S$ と $\tau\&T$ の二組について

$$\alpha(\sigma)|_{S\cap T} = s|_{S\cap T} = \alpha(\tau)|_{S\cap T}.$$

したがって α :: inj から $\sigma|_{S\cap T} = \tau|_{S\cap T}$．こうして Gluability Axiom から，$\alpha(\sigma)|_S = \alpha(\Sigma)|_S = s|_S$ なる $\Sigma \in \mathcal{F}(U)$ の存在が示せる．最後に Identity Axiom を用いて $\alpha(\Sigma) = s$．これで α :: iso が示せた．

■UMP of Sheafification. $Sh = Sec\acute{E}t$ とすると，これが sheafification functor となる．その UMP を見よう．$\mathcal{F} \in \mathbf{PSh}(X), \mathcal{G} \in \mathbf{Sh}(X)$ とする．$\alpha : \mathrm{id}_{\mathbf{Sh}(X)} \to Sh$ の naturality から，次の可換図式が得られる．

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{F} & \longrightarrow & Sh\mathcal{F} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \mathcal{G} & \xrightarrow{\sim} & Sh\mathcal{G} \end{array}$$

$\alpha_{\mathcal{G}} : \mathcal{G} \to Sh\mathcal{G}$ :: iso だから，$\mathcal{F} \to \mathcal{G}$ から $Sh\mathcal{F} \to \mathcal{G}$ が得られた．次に，以下で示す可換図式 (1) が与えられたとしよう．全体を Sh で写し，$Sh|_{\mathbf{Sh}(X)} \cong \mathrm{id}_{\mathbf{Sh}(X)}$ を用いて可換図式 (2) が得られる．

$$(1)\quad \begin{array}{ccc} Sh\mathcal{F} & \overset{f}{\underset{g}{\rightrightarrows}} & \mathcal{G} \\ {\scriptstyle\alpha_{\mathcal{F}}}\uparrow & \nearrow_{\phi} & \\ \mathcal{F} & & \end{array} \qquad (2)\quad \begin{array}{ccc} Sh\mathcal{F} & \overset{f}{\underset{g}{\rightrightarrows}} & \mathcal{G} \\ \| & \nearrow_{Sh\phi} & \\ Sh\mathcal{F} & & \end{array}$$

したがって $f = g$．以上で existence & uniqueness が示せた．

Ex1.14 Support.

$\mathcal{F} \in \mathbf{Sh}(X), U$ :: open in $X, s \in \mathcal{F}(U)$ をとる．$\mathrm{Supp}\, s = \{P \in U \mid s_P \neq 0\}$ としたとき，これが closed in U であることを示そう．そのために $T = (\mathrm{Supp}\, s)^c = \{P \in U \mid s_P = 0\}$ として，これが open であることを示す．

$P \in T$ を任意に取る．すると s_P の代表元として $\langle V_P, s\rangle$ $(P \in V_P \subset U)$ が取れる．今 $s_P = 0$ なので，$s|_{V_P} = 0$．したがって $V_P \subset T$ となる．任意の $P \in T$ についてこのように V_P が取れるので，T は open covering $\{V_P\}_{P\in T}$ を持つ．よって $T = \bigcup_{P\in T} V_P$ :: open in U.

$\mathrm{Supp}\,\mathcal{F}$ は $\{P \in X \mid \mathcal{F}_P \neq 0\}$ と定義される．これは closed とは限らない．実際，$\mathcal{F}$ の元を，なめらかな実関数に $bump(x) = [x > 0]e^{-1/x}$ [†7] をかけたものとすると，$\mathrm{Supp}\, bump(x) = [0, \infty), \mathrm{Supp}\,\mathcal{F} = (0, \infty)$ となる．後者は明らかに閉集合でない．

Ex1.15 Sheaf $\mathscr{H}\!om$.

$\mathcal{F}, \mathcal{G} \in \mathbf{Sh}(X), U$ :: open in X とし，$\mathcal{F}$ の U への restrction(p.65) を $\mathcal{F}|_U$ で書く．$U \mapsto \mathrm{Hom}(\mathcal{F}|_U, \mathcal{G}|_U)$ で定まる presehaf $\mathscr{H}\!om(\mathcal{F}, \mathcal{G})$ が sheaf であることを示そう．以下では U とその開被

[†5] $\bar{\sigma}$ の像位相において，開集合 V の像が開集合であることは $\bar{\sigma}^{-1} \circ \bar{\sigma}(V)$ が開集合であることと同値だが，単射性から，この集合は V に等しい．

[†6] これは $\epsilon - \delta$ 論法に似ている．$s^{-1}(V)$ が開集合ならば，その任意の点が内点であるから，開集合 S が存在することは自明である．

[†7] $[True] = 1, [False] = 0$ とした．Iverson の記法である．$bump(x)$ がなめらかであることは次の PDF を参照せよ: `https://andromeda.rutgers.edu/~loftin/difffal03/bump.pdf`.

覆 $\{U_\lambda\}_{\lambda\in\Lambda}$ を任意にとって固定する．

■$\mathscr{H}om(\mathcal{F},\mathcal{G})(U)$ :: Abelian Group. $s,t\in\mathscr{H}om(\mathcal{F},\mathcal{G})(U)$ について，$s+t$ を以下で定める．

$$(s+t)(\sigma)=s(\sigma)+t(\sigma)\ \text{ where }\ V :: \text{open in } U,\ \sigma\in(\mathcal{F}|_U)(V).$$

単位元は $\mathrm{im}\,\mathcal{F}|_U$ の単位元を返す定値写像である．単位元を以下では 0 と書く．

■$\mathscr{H}om(\mathcal{F},\mathcal{G})$ :: Presheaf. U,V :: open かつ $V\subseteq U$ とする．$\overline{\mathrm{res}}_U^V : \mathscr{H}om(\mathcal{F},\mathcal{G})(U)\to\mathscr{H}om(\mathcal{F},\mathcal{G})(V)$ を以下のように定める．

$$\{\mathcal{F}|_U\ni\sigma|_U\mapsto\tau|_U\in\mathcal{G}|_U\}\mapsto\{\mathcal{F}|_V\ni\sigma|_V\mapsto\tau|_V\in\mathcal{G}|_V\}$$

これは $\mathrm{res}(\mathcal{F})_U^V:\mathcal{F}(U)\to\mathcal{F}(V)$ と $\mathrm{res}(\mathcal{G})_U^V:\mathcal{G}(U)\to\mathcal{G}(V)$ の自然性から誘導される．

■Identity Axiom. $s\in\mathscr{H}om(\mathcal{F},\mathcal{G})(U)=\mathrm{Hom}(\mathcal{F}|_U,\mathcal{G}|_U)$ をとる．この s が任意の λ について $s|_{U_\lambda}=0$ を満たすとする．さて，V :: open in U と $\sigma\in\mathcal{F}(V)$ を任意に取る．$\{V_\lambda\}$ を $V_\lambda=V\cap U_\lambda$ で定めると，これは V の開被覆になる．仮定より，$s|_{V_\lambda}(\sigma)=s(\sigma)|_{V_\lambda}=0$．よって $s(\sigma)\in\mathcal{G}(V)$ に Indentity Axiom を用いることで $s(\sigma)|_V=0$ が示される．V,σ は任意なので，結局以下が得られた．

$${}^\forall V :: \text{open in } U,\ \ {}^\forall\sigma\in\mathcal{F}(V),\ \ s(\sigma)=0.$$

すなわち，s は定値写像 0 である．以上で Indentity Axiom の成立が示された．

■Gluability Axiom. sections $s_\lambda\in\mathscr{H}om(\mathcal{F},\mathcal{G})(U_\lambda)$ をとる．これが任意の $\lambda,\mu\in\Lambda$ について $s_\lambda|_{U_\lambda\cap U_\mu}=s_\mu|_{U_\lambda\cap U_\mu}$ を満たすとしよう．この仮定は以下のように書ける．

$${}^\forall\lambda,\mu\in\Lambda,\ \ {}^\forall\sigma\in\mathcal{F}(U_\lambda\cap U_\mu),\ \ s_\lambda(\sigma)=s_\mu(\sigma).$$

そこで λ をひとつ取って固定し，$\sigma\in\mathcal{F}(U_\lambda)$ とする．さらに $\{V_\mu\}_{\mu\in\Lambda}$ を $V_\mu=U_\lambda\cap U_\mu$ で定める．この $\{V_\mu\}$ は U_λ の開被覆である．すると最初の仮定と $V_\mu\cap V_\nu=U_\lambda\cap(U_\mu\cap U_\nu)\subseteq U_\mu\cap U_\nu$ から以下が成り立つ．

$${}^\forall\mu,\nu\in\Lambda,\ \ s_\mu(\sigma)|_{V_\mu\cap V_\nu}=s_\nu(\sigma)|_{V_\mu\cap V_\nu}.$$

sections $s_\mu(\sigma)\in\mathcal{G}(U_\lambda)$ に対して Gluability Axiom を用いて，$s(\sigma)|_{V_\mu}=s_\mu(\sigma)|_{V_\mu}$ なる $s(\sigma)$ の存在が言える．Indentity Axiom から $s(\sigma)|_{U_\lambda}=s_\mu(\sigma)|_{U_\lambda}$．こうして，以下を満たす $s\in\mathscr{H}om(\mathcal{F},\mathcal{G})(U)$ の像が各点 $\sigma\in\mathcal{F}(U_\lambda)$ ごとに定義できる．

$${}^\forall\lambda\in\Lambda,\ \ {}^\forall\sigma\in\mathcal{F}(U_\lambda),\ \ s(\sigma)|_{U_\lambda}=s_\lambda(\sigma)|_{U_\lambda}.$$

簡潔にかけば，$s|_{U_\lambda}=s_\lambda|_{U_\lambda}$．よって Gluability Axiom の成立が示せた．

Ex1.16 Flasque Sheaves.

U,V :: open in X，$V\subseteq U$ とする．restriction map res_U^V が surjective であるような $\mathcal{F}\in\mathbf{Sh}(X)$ を flasque[†8] sheaf と呼ぶ．

[†8] フランス語．フラスコのこと．軟弱という意味．発音は `https://ja.forvo.com/word/flasque/`．

(a) Constant Sheaf on Irreducible Top.Sp is Flasque.

X :: irreducible，A :: abelian group, U, V :: open in X，$V \subseteq U$ とする．$\mathcal{A}$ を X から A への constant sheaf とすると，定義より $\mathcal{A}(V) = \{s : V \to A \mid s :: \text{continuous.}\ \}$．そこで $s \in \mathcal{A}(V)$ を一つとって固定する．s :: continuous という条件は次と同値

$$^{\forall}a \subseteq A,\quad s^{-1}(a) :: \text{open in } V.$$

X :: irreducible であるとき，$s \in \mathcal{F}(V)$ がどのようなものか考えよう．

■Case: $\#A = 1$.　まず $\#A = 1$，すなわち A が自明な abelian group $\{e\}$ であったとする．この時，明らかに $\mathcal{F}(V)$ は定値写像 $x \mapsto e$ のみからなる．$\mathcal{F}(U)$ も同じ定値写像からなるので，この時 constant sheaf は flasque.

■Case $\#A > 1$.　$a \neq b$ が成り立つような $a, b \in A$ を任意に取る．すると以下が成り立つ．

$$s^{-1}(\{a\}) \cap s^{-1}(\{b\}) = s^{-1}(\{a\} \cap \{b\}) = s^{-1}(\emptyset) = \emptyset.$$

したがって X :: irreducible から $s^{-1}(\{a\})$ or $s^{-1}(\{b\}) = \emptyset$．仮に任意の $a \in A$ について $s^{-1}(\{a\}) = \emptyset$ であったとすると s が写像にならない．したがって $s^{-1}(\{a_s\}) \neq \emptyset$ となる $a_s \in A$ がただひとつ存在する．s は写像なので $s^{-1}(A) = V$ が成り立ち，したがって s はこのような a_s への定値写像である事が分かる．すると容易に s は U へ拡張できるので，この時も constant sheaf は flasque.

(b) If $0 \to \mathcal{F}' \to \mathcal{F} \to \mathcal{F}'' \to 0$ is Exact and $\mathcal{F}'$ is Flasque, then...

$0 \to \mathcal{F}' \to \mathcal{F} \to \mathcal{F}'' \to 0$ が exact かつ $\mathcal{F}'$ が flasque であったとする．この時，任意の open set U について $0 \to \mathcal{F}'(U) \to \mathcal{F}(U) \to \mathcal{F}''(U) \to 0$ は exact であることを示す．

写像に $0 \to \mathcal{F}' \xrightarrow{f} \mathcal{F} \xrightarrow{g} \mathcal{F}'' \to 0$ と名前をつけ，U :: open in X と $s'' \in \mathcal{F}''(U)$ をとる．Ex1.8 より，$0 \to \mathcal{F}'(U) \xrightarrow{f_U} \mathcal{F}(U) \xrightarrow{g_U} \mathcal{F}''(U)$ は exact．なのであとは g_U が surjective であることを示せば良い．元の exact sequence から g :: surj が言える．Ex1.3 より，以下が成り立つ．

$$(*)\qquad \bigcup {}^{\exists}U_i = U,\ \ {}^{\exists}t_i \in \mathcal{F}(U_i),\ \ {}^{\forall}i,\ \ g(t_i) = s''|_{U_i}.$$

任意に i, j をとり，以下の可換図式で diagram chase をする．ただし $U = U_i \cap U_j$ とした．

$$\begin{tikzcd}
0 \arrow[rr] & & \mathcal{F}'(U) \arrow[rr, tail, "f"] \arrow[dr] \arrow[dd] & & \mathcal{F}(U) \arrow[rr, "g"] \arrow[dr] \arrow[dd] & & \mathcal{F}''(U) \arrow[dr] \arrow[dd] & \\
& 0 \arrow[rr] & & \mathcal{F}'(U_j) \arrow[rr, tail, "f"] \arrow[dd] & & \mathcal{F}(U_j) \arrow[rr, "g"] \arrow[dd] & & \mathcal{F}''(U_j) \arrow[dd] \\
0 \arrow[rr] & & \mathcal{F}'(U_i) \arrow[rr, tail, "f"] \arrow[dr] & & \mathcal{F}(U_i) \arrow[rr, "g"] \arrow[dr] & & \mathcal{F}''(U_i) \arrow[dr] & \\
& 0 \arrow[rr] & & \mathcal{F}'(U_{ij}) \arrow[rr, tail, "f"] & & \mathcal{F}(U_{ij}) \arrow[rr, "g"] & & \mathcal{F}''(U_{ij})
\end{tikzcd}$$

$s'' \in \mathcal{F}''(U)$ と，$(*)$ から存在が示される $t_i \in \mathcal{F}(U_i), t_j \in \mathcal{F}(U_j)$ から diagram chasing を始める．

(1) naturality から $g(t_i|_{U_{ij}}) = s''|_{U_{ij}} = g(t_j|_{U_{ij}})$.

(2) よって列の完全性から $t_i - t_j \in \ker g|_{U_{ij}} = \operatorname{im} f|_{U_{ij}}$.

(3) したがって $f(u'_{ij}) = t_i - t_j$ なる $u'_{ij} \in \mathcal{F}'(U_{ij})$ が存在する.

(4) $\mathrm{res}_U^{U_{ij}}$ :: surj から $s'_{ij}|_{U_{ij}} = u'_{ij}$ なる $s'_{ij} \in \mathcal{F}'(U)$ が存在する.

(5) $s_i = f(s'_{ij})|_{U_i} + t_j \in \mathcal{F}(U_i)$ とおく.（足すのは t_j であることに注意.）

(6) 構成より，$g(s_i)|_{U_{ij}} = g(t_i|_{U_{ij}}) = s''|_{U_{ij}}$.

(7) i を固定して j を動かすことで，Identity Axiom により $g(s_i) = s''|_{U_i}$ が得られる.

(8) $g(s_i) \in \operatorname{im} g$ に Gluability Axiom を用いて，$g(s)|_{U_i} = g(s_i) = s''|_{U_i}$ なる $s \in \mathcal{F}(U)$ がとれる（？）.

(9) Identity Axiom から $g(s) = s''$.

(i) Another Proof

次の PDF の Lemma2.12(p.10) がこの演習問題と同じ命題である: `http://www.math.mcgill.ca/goren/SeminarOnCohomology/Sheaf_Cohomology.pdf`. 次の PDF の Lemma0.3(p.12) も同じ: `http://www.uio.no/studier/emner/matnat/math/MAT4215/v15/notes1.pdf`. どちらの証明でも Zorn's Lemma が用いられている.

(c) If $0 \to \mathcal{F}' \to \mathcal{F} \to \mathcal{F}'' \to 0$ is Exact and $\mathcal{F}', \mathcal{F}$ is Flasque, then $\mathcal{F}''$ also.

U, V :: open in X, $V \subseteq U$ とする. (b) より，以下の完全列が得られる.

$$\begin{tikzcd}
0 \arrow[r] & \mathcal{F}'(U) \arrow[r, tail, "f"] \arrow[d] & \mathcal{F}(U) \arrow[r, two heads, "g"] \arrow[d] & \mathcal{F}''(U) \arrow[r] \arrow[d] & 0 \\
0 \arrow[r] & \mathcal{F}'(V) \arrow[r, tail, "f"] & \mathcal{F}(V) \arrow[r, two heads, "g"] & \mathcal{F}''(V) \arrow[r] & 0
\end{tikzcd}$$

証明は diagram chasing による.

(1) $s'' \in \mathcal{F}''(V)$ を任意に取る.

(2) $\mathcal{F}(U) \to \mathcal{F}(V) \to \mathcal{F}''(V)$ :: surj から，$g(\tilde{s})|_V = s''$ なる $\tilde{s} \in \mathcal{F}(U)$ が取れる.

(3) naturality から $g(\tilde{s}|_V) = s'' = g(\tilde{s})|_V$.

$s := g(\tilde{s}) \in \mathcal{F}''(U)$ とおけば $s|_V = s''$.

(d) If $f : X \to Y$ is Conti. and $\mathcal{F}$ is Flasque, then $f_*\mathcal{F}$ is Flasque.

U, V :: open in Y，$V \subseteq U$ とする. このとき $f^{-1}(V) \subseteq f^{-1}(U)$. なので $\mathcal{F}(U) \to \mathcal{F}(V)$ :: surj より $\mathcal{F}(f^{-1}(U)) \to \mathcal{F}(f^{-1}(V))$ :: surj. $f_*\mathcal{F}(U) = \mathcal{F}(f^{-1}(U))$ だから，$f_*\mathcal{F}$ :: flasque.

(e) Discontinuous Sections.

$\mathcal{F} \in \mathbf{Sh}(X)$ とする. これに対し，discontinuous sections of $\mathcal{F}$ と呼ばれる sheaf $\mathcal{G}$ が以下のように作れる. π は Ex1.13 の $s_P \mapsto P$ なる写像である.

$$\mathcal{G} : U \mapsto \left\{ s : U \to \coprod_{P \in U} \mathcal{F}_P \;\middle|\; \pi \circ s = \mathrm{id}_U \right\}$$

$\mathcal{G}$ が flasque sheaf であることと，$\mathcal{F} \to \mathcal{G}$ の自然な単射が存在することを示す.

■$\mathcal{G}$ :: sheaf. $\mathcal{G}$ :: presheaf は明らか．sheaf であることを示すため，U :: open in X とその open cover $\{U_i\}_{i\in I}$ をとり，固定する．任意の $i \in I$ について $s|_{U_i} = 0$ であるような $s \in \mathcal{G}(U)$ が存在したとする．$\bigcup U_i = U$ より，任意の点 $P \in U$ に対して $s(P) = 0$．これは Identity Axiom の成立を意味する．同様に "$^\forall i, j$, $^\forall P \in U_i \cap U_j$, " を "$^\forall P \in U$, " に書き換えるだけで，Gluability Axiom の成立が証明できる．

■$\mathcal{G}$ :: flasque. $V \subset U$ とする．$s \in \mathcal{G}(V)$ をとる．これは例えば以下のように拡張できる．

$$\bar{s}(P) = \begin{cases} s(P) & (P \in V) \\ 0 & (P \in U \setminus V) \end{cases}$$

■α in Ex1.13 is injective. Ex1.13 の $\alpha : s \mapsto [P \mapsto s_P]$ が injective であることは以下のように示される．ある $s, t \in \mathcal{F}(U)$ について $\alpha(s) = \alpha(t)$ が成立するとしよう．すると十分小さい open set $(P \in)V_P(\subset U)$ が存在して，$s|_{V_P} = t|_{V_P}$ となる．明らかに $\{V_P\}_{P\in U}$ は U の open cover なので，$s - t \in \mathcal{G}$ に Identity Axiom を用いて $s = t$ が得られる．

Ex1.17 Skyscraper Sheaves.

X :: topological space, $P \in X$, A :: abelian group とする．sheaf $i_P(A)$ を以下で定める．

$$i_P(A)(U) = \begin{cases} A & (P \in U) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

点 P を含む最小の閉集合を $\{P\}^-$ と書く．

(a) $(i_P(A))_Q = A$ is A if $Q \in \{P\}^-$, otherwise 0 .

U を Q を含む極小の開集合とした時，$(i_P(A))_Q$ は集合として $\mathcal{F}(U)$ と一致する．したがって以下が成立する．

$$\begin{aligned} & (i_P(A))_Q = A \\ \iff & {}^\forall U \subset X,\ \ Q \in U \implies P \in U \\ \iff & {}^\forall U \subset X,\ \ P \in U^c \implies Q \in U^c. \end{aligned}$$

最後の行は対偶として得られた．一方，点 P を含む最小の閉集合 $\{P\}^-$ は以下を満たす唯一の集合として特徴づけられる．

$$^\forall U \subset X,\ \ P \in U^c \implies \{P\}^- \subseteq U^c$$

よって $(i_P(A))_Q = A \iff Q \in \{P\}^-$．他の場合は明らかに $(i_P(A))_Q = 0$ となる．また，この特徴付けの対偶から $U \cap \{P\}^- \neq \emptyset$ ならば $P \in U$．$P \in U$ ならば $P \in U \cap \{P\}^-$ なので逆も成立する．

(b) $i_P(A)$ can be described as direct image.

abelian group A に伴う $\{P\}^-$ 上の constant sheaf を $\mathcal{A}$ とする．すると $i_P(\mathcal{A})$ は埋め込み写像 $i : \{P\}^- \hookrightarrow X$ の direct image $i_*(\mathcal{A})$ に等しい．実際，開集合 U について $i_*(\mathcal{A})(U) = \mathcal{A}(i^{-1}(U)) = \mathcal{A}(U \cap \{P\}^-)$ であるから以下のようになる．

$$i_*(\mathcal{A})(U) \cong \begin{cases} A & (U \cap \{P\}^- \neq \emptyset) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}.$$

(a) で見たとおり $U \cap \{P\}^- \neq \emptyset$ と $P \in U$ は同値．よって $i_*(\mathcal{A}) = i_P(A)$．特に，$\{P\}^-$ はその最小性から irreducible なので，Ex1.16a,d と合わせれば $i_P(A)$ は flasque であることが分かる．

Ex1.18　Adjoint Property of f^{-1}.

$f : X \to Y$ :: continuous map について，f^{-1} が f_* の left adjoint functor であることを示す．left adjoint の定義としては Hom についての定義を用いる．

unit $\eta : \mathrm{id}_{\mathbf{Sh}(Y)} \to f_* f^{-1}$ と counit $\eta : f^{-1} f_* \to \mathrm{id}_{\mathbf{Sh}(X)}$ を構成する．

Ex1.19　Extending a Sheaf by Zero.

X :: topological space, Z :: closed subset in X，$U = X \setminus Z$ とする．さらに $i : Z \hookrightarrow X, j : U \hookrightarrow X$ を埋め込み写像とする．

(a)　$i_*\mathcal{F}$: Extending $\mathcal{F} \in \mathbf{Sh}(Z)$ by Zero Outside Z.

$\mathcal{F} \in \mathbf{Sh}(Z)$ とする．以下を示す．

$$(i_*\mathcal{F})_P = \begin{cases} \mathcal{F}_P & (P \in Z) \\ 0 & (P \notin Z) \end{cases}$$

(b)　$j_!\mathcal{F}$: Extending $\mathcal{F} \in \mathbf{Sh}(U)$ by Zero Outside U

$\mathcal{F} \in \mathbf{Sh}(U)$ とし，$j_!\mathcal{F}$ を以下で定まる presheaf の sheafification とする．

$$(j_!\mathcal{F})^{pre}(V) = \begin{cases} \mathcal{F}(V) & (V \subseteq U) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

この時，以下を示す．

$$(j_!\mathcal{F})_P = \begin{cases} \mathcal{F}_P & (P \in U) \\ 0 & (P \notin U) \end{cases}$$

(c)　$0 \to j_!(\mathcal{F}|_U) \to \mathcal{F} \to i_*(\mathcal{F}|_Z) \to 0$ is Exact.

Ex1.20　Subsheaf with Supports.

Z :: closed in X, $\mathcal{F} \in \mathbf{Sh}(X)$ とする．$\Gamma_Z(X, \mathcal{F})$ を以下で定める．

$$\Gamma_Z(X, \mathcal{F}) = \{s \in \Gamma(X, \mathcal{F}) = \mathcal{F}(Z) \mid \operatorname{Supp} s \subseteq Z.\}.$$

(a)　Presheaf $V \mapsto \Gamma_{V \cap Z}(V, \mathcal{F}|_V)$ is a Sheaf.

Presheaf $\mathscr{H}_Z^0(\mathcal{F})$ を

$$\mathscr{H}_Z^0(\mathcal{F}) : V \mapsto \Gamma_{V \cap Z}(V, \mathcal{F}|_V)$$

で定める．これが sheaf であることを示そう．

(b) For $U = X \setminus Z$, $0 \to \mathscr{H}^0_Z(\mathcal{F}) \to \mathcal{F} \to j_*(\mathcal{F}|U)$ is Exact.

さらに，$\mathcal{F}$ :: flasque ならば $0 \to \mathscr{H}^0_Z(\mathcal{F}) \to \mathcal{F} \to j_*(\mathcal{F}|U) \to 0$ も exact であることを示す．

Ex1.21 Some Examples of Sheaves on Varieties.

k :: algebraically closed field, X :: variety over k とする．$\mathcal{O}_X$ を the sheaf of regular functons on X (Example 1.0.1) とする．

(a) The Sheaf of Ideals $\mathcal{I}_Y$.

Y :: closed in X とする．任意の U :: open in X について，$\mathcal{I}_Y(U)$ を以下で定める．

$$\mathcal{I}_Y : U \mapsto \{f \in \mathcal{O}_X(U) \mid {}^\forall P \in Y \cap U, \quad f(P) = 0.\}.$$

$\mathcal{I}_Y(U)$ は $\mathcal{O}_X(U)$ のイデアルである．この時，$\mathcal{I}_Y (\subseteq \mathcal{O}_X)$ が sheaf であることを示す．

(b) If Y :: subvariety, then $\mathcal{O}_X \cong i_*(\mathcal{O}_Y)$.

(c)

(d)

(e)

Ex1.22 Glueing Sheaves.

X :: topological space, $\mathfrak{U} = \{U_i\}_{i \in I}$ :: open cover of X, $\mathcal{F}_i \in \mathbf{Sh}(U_i)$ とする．この $\{\mathcal{F}_i\}_{i \in I}$ に付随して，同型写像 $\phi_{ij} : \mathcal{F}_i|_{U_i \cap U_j} \xrightarrow{\equiv} \mathcal{F}_j|_{U_i \cap U_j}$ が存在し，$\{\mathcal{F}_i\}_{i \in I}$ with $\{\phi_{ij}\}_{i,j \in I}$ が inverse system をなすとする．この時，inverse limit の存在を示す．この命題は section でなく sheaf の Gluablity Axiom と言える．

abelian group $\mathcal{F}(U)$ を以下で定める．

$$\mathcal{F}(U) = \left(\bigsqcup_{i \in I} \{i\} \times \mathcal{F}_i(U \cap U_i) \right) \Big/ \sim.$$

ただし $\sim$ は以下で定まる同値関係である．

$$(i, s) \sim (j, t) \iff (\phi_{ij})_{U \cap U_i \cap U_j}(s) = t.$$

$s \in \mathcal{F}_i(U \cap U_i)$ に注意せよ．これが同値関係であることは自明なので証明を略す．

(i) $\mathcal{F}(U)$ :: abelian group.

任意の 2 元 $(i, s), (j, t) \in \mathcal{F}(U)$ に対し，(j, t) が属す同値類から $(i, t') \in \{i\} \times \mathcal{F}_i(U \cap U_i)$ が取れる．これは $\phi_{ij} : \mathcal{F}_i|_{U_i \cap U_j} \xrightarrow{\equiv} \mathcal{F}_j|_{U_i \cap U_j}$ が全単射（同型）だからである．この時，$(i, s) + (j, t)$ は $(i, s + t')$ で定義できる．可換性は $\mathcal{F}_*(U \cap U_*)$ の元が可換であることから得られる．単位元は $(i, 0)$ である．

(ii) $\mathcal{F}$ :: sheaf.

(iii) $\mathcal{F}|_{U_i} \equiv \mathcal{F}_i$.