

連接層の安定性とそのモジュライ

HADA YOHEI

ABSTRACT. 本 pdf は, 1/8 日以降の Huybrechts-Lehn[2] のセミナーの発表ノートである. 内容は基本的に [2] に則っているが, 時々他の文献も参考になっている.

CONTENTS

1. 予備知識	1
1.1. Notation	1
1.2. 安定性の定義	1
1.3. Harder-Narasimhan フィルトレーション	7
1.4. 具体例	10
1.5. Jordan-Hölder フィルトレーション	13
1.6. μ -安定性	15
1.7. 有界性	17
Appendix A. 反射的層	24
Appendix B. 平坦性の局所的特徴づけ	26
References	27

1. 予備知識

1.1. Notation.

- スキーム X について, $\mathrm{Coh}(X)$ で, 連接 \mathcal{O}_X 加群のなす圏とする. また, $F \in \mathrm{Coh}(X)$ について, $\dim(F) = \dim(\mathrm{Supp}(F))$ と定める.
- (半) 安定性について, 文「... が (半) 安定である (ならば/とは/etc.), ... $A(\leq)B$ である」を, 「... が安定である (ならば/とは/etc.), ... $A < B$ であり, ... が半安定である (ならば/とは/etc.), ... $A \leq B$ である」と解釈する.

1.2. **安定性の定義.** Hilbert 多項式についての基礎的な事項を復習する. 以下, X を (無限) 体 k 上の射影的スキームとして, $\mathcal{O}(1)$ を X 上の豊富な直線束として固定する. この時, X 上の連接層 F の Hilbert 多項式 $P(F, m)$ は以下で定義された:

$$P(F, m) = \chi(F(m))$$

ここで, χ は Euler 標数.

Proposition 1.2.1. $F \in \mathrm{Coh}(X)$, $\dim(F) = d$ として, $H_1, \dots, H_d \in |\mathcal{O}(1)|$ を F -正則列とする. この時,

$$\chi(F(m)) = \sum_{i=0}^d \binom{m+i-1}{i} \chi(F|_{\cap_{j \leq i} H_j})$$

となる.

proof. d による帰納法. $d = 0$ の時は明らか. $d < d_0$ で命題が成立すると仮定する. $F \in \text{Coh}(X)$ が $\dim(F) = d_0$ の時, H_1 は F -正則なので, $F|_{H_1}$ は $d_0 - 1$ 次元となる. よって, 帰納法の仮定から,

$$\chi(F|_{H_1}(m)) = \sum_{i=0}^{d_0-1} \binom{m+i-1}{i} \chi(F|_{\cap_{j \leq i+1} H_j})$$

となる. 完全列

$$0 \rightarrow F(m-1) \rightarrow F(m) \rightarrow F|_{H_1}(m) \rightarrow 0$$

より,

$$\chi(F(m)) - \chi(F(m-1)) = \chi(F|_{H_1}(m)) = \sum_{i=0}^{d_0-1} \binom{m+i-1}{i} \chi(F|_{\cap_{j \leq i+1} H_j})$$

となるので,

$$\begin{aligned} \chi(F(m)) &= \chi(F) + \sum_{l=1}^m \sum_{i=0}^{d_0-1} \binom{l+i-1}{i} \chi(F|_{\cap_{j \leq i+1} H_j}) \\ &= \chi(F) + \sum_{i=1}^{d_0} \left(\sum_{l=1}^m \binom{l+i-2}{i-1} \right) \chi(F|_{\cap_{j \leq i} H_j}) \\ &= \chi(F) + \sum_{i=1}^{d_0} \binom{m+i-1}{i} \chi(F|_{\cap_{j \leq i} H_j}) \\ &= \sum_{i=0}^d \binom{m+i-1}{i} \chi(F|_{\cap_{j \leq i} H_j}) \end{aligned}$$

がわかった. □

一般に, F の Hilbert 多項式はたかだか $\dim(F)$ 次の多項式であることが知られている. よって, 特に $\alpha_i(F) \in \mathbb{Q}$ ($i = 0, \dots, d$) を用いて,

$$P(F, m) = \sum_{i=0}^d \frac{\alpha_i(F)}{i!} m^i$$

とかける.

Remark 1.2.1. $\mathcal{O}(N)$ が非常に豊富の時, F の正則列 $H_1, \dots, H_d \in |\mathcal{O}(N)|$ をとって

$$P(F, mN) = \sum_{i=0}^d \binom{m+i-1}{i} \chi(F|_{\cap_{j \leq i} H_j})$$

となる. よって, この先頭係数を見ることで, $\alpha_d(F) = \frac{1}{N^d} \chi(F|_{\cap_{i \leq d} H_i}) \in \frac{1}{N^d} \mathbb{Z}_{\geq 0}$ がわかる. この $\alpha_d(F)$ は F の重複度といい, 今見たように, 取れる値が離散的であることに注意.

Definition 1.2.1. $F \in \text{Coh}(X)$ を $\dim(F) = \dim(X) = d$ となる接続層とする. この時, F の階数を $\text{rk}(F) = \frac{\alpha_d(F)}{\alpha_d(\mathcal{O}_X)}$ で定める.

Proposition 1.2.2. X が整スキームなら, $\text{rk}(F)$ は生成ファイバーの次元と一致する.

proof. General Flatness から, X のある開集合 U が存在して, $F|_U$ は自由 \mathcal{O}_U 加群になる. U をいずれかの標準 affine 開集合に含まれる affine 開集合として良い. $F|_U$ の階数を r とおき, 同型 $\phi: \mathcal{O}_U^{\oplus r} \rightarrow F|_U$ をひとつとる. ϕ は $\text{Hom}_{\mathcal{O}_X}(\mathcal{O}_X^{\oplus r}, F)$ の U で切断で, 同型 $\psi: \mathcal{O}_X(-m)^{\oplus r}|_U \cong \mathcal{O}_U^{\oplus r}$ を定める.

$$0 \rightarrow K \rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{O}_X}(\mathcal{O}_X^{\oplus r}, F) \rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{O}_U}(\mathcal{O}_U^{\oplus r}, F|_U) \rightarrow 0$$

について, $m \gg 0$ で $H^1(X, K(m)) = 0$ なので, この m について,

$$\text{Hom}(\mathcal{O}_X(-m)^{\oplus r}, F) \rightarrow \text{Hom}(\mathcal{O}_U(-m)^{\oplus r}, F|_U) \cong \text{Hom}(\mathcal{O}_U^{\oplus r}, F|_U)$$

は全射. よって, ϕ はある $\tilde{\phi}: \mathcal{O}_X(-m)^{\oplus r} \rightarrow F$ に伸びる. $\text{Ker}\phi$ および $\text{Cok}\phi$ はともに U の外にあるので, 次元が落ちている. よって, $\alpha_d(F) = \alpha_d(\mathcal{O}_X^{\oplus r}) = r\alpha_d(\mathcal{O}_X)$. \square

Remark 1.2.2. 一般には, $\text{rk}(F)$ は整数とは限らない.

Definition 1.2.2. $F \in \text{Coh}(X)$ について, 簡約 Hilbert 多項式 $p(F)$ を,

$$p(F, m) = \frac{P(F, m)}{\alpha_d(F)}$$

と定める. ここで, $d = \dim(F)$ である.

2 つの実係数多項式 f, g について, $f \leq g$ (あるいは $f < g$) とは, $m \gg 0$ について, $f(m) \leq g(m)$ (あるいは $f(m) < g(m)$) となることとして定める. これは多項式の次数が大きい順に通常の辞書式に順序関係を入れた順序で大小を見ることと同じである.

Definition 1.2.3. $E \in \text{Coh}(X)$ を純な加群層とする. E が (Gieseker-丸山)(半) 安定であるとは, 任意の部分加群層 $F \subsetneq E$ について, $p(F)(<=)p(E)$ となることを指す.

Proposition 1.2.3. $E \in \text{Coh}(X)$ を純な接続層として, $\dim E = d$ とおく. この時, 以下は同値である:

- (1) E が (半) 安定である
- (2) 任意の飽和な真の部分加群層 $F \subset E$ について, $p(F)(<=)p(E)$ である
- (3) 任意の真の商 $E \rightarrow G$ について, $\alpha_d(G) > 0$ ならば $p(E)(<=)p(G)$ となる.
- (4) 任意の真の純 d 次元の商 $E \rightarrow G$ について, $p(E)(<=)p(G)$ となる.

proof. (1) \implies (2), (3) \implies (4) は明らか. 短完全列

$$0 \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow 0$$

をみる. $P(E) = P(F) + P(G)$ と, $\alpha_d(E) = \alpha_d(F) + \alpha_d(G)$ から,

$$\alpha_d(G)(p(E) - p(G)) = \alpha_d(F)(p(F) - p(E))$$

を得る. よって, (1) \implies (3), (2) \iff (4) がわかる. (2) \implies (1) は, F' を F の飽和化とすると, $P(F) \leq P(F')$, $\alpha_d(F) = \alpha_d(F')$ となることからわかる. \square

Proposition 1.2.4. $F, G \in \text{Coh}(X)$ を半安定な接続層とする.

- (1) $p(F) > p(G)$ なら, $\text{Hom}(F, G) = 0$.
- (2) $p(F) = p(G)$ で, F が安定なら, 任意の $0 \neq \phi \in \text{Hom}(F, G)$ は単射.
- (3) $p(F) = p(G)$ で, G が安定なら, 任意の $0 \neq \phi \in \text{Hom}(F, G)$ は全射.
- (4) $p(F) = p(G)$ かつ $\alpha_d(F) = \alpha_d(G)$ なら, F か G のいずれかが安定なら任意の $0 \neq \phi \in \text{Hom}(F, G)$ は同型.

proof. $p(F) \geq p(G)$ とする. $\phi : F \rightarrow G$ の像 $\phi(F)$ は $F/\text{Ker}(\phi)$ と同型なので, これが 0 でないなら $p(F) \leq p(\phi(F)) \leq p(G)$ となる. よって, もし $p(F) > p(G)$ ならこのようなことはあり得ない. $p(F) = p(G)$ かつ F が安定なら, $\phi \neq 0$ を仮定すると, $p(F) = p(\phi(F))$ がわかり, この等号が成立するのは $F \cong \phi(F)$ のときのみなので, $\text{Ker}(\phi) = 0$ がわかる. したがって, ϕ は単射. $p(F) = p(G)$ で, G が安定なら, $p(\phi(F)) = p(G)$ から, $\phi = 0$ または $\phi(F) = G$ がわかる. また, $p(F) = p(G)$ かつ $\alpha_d(F) = \alpha_d(G)$ なら, F (resp. G) が安定なら, ϕ は単射 (resp. 全射) だが, $P(F) = P(G)$ なので, 核 (resp. 余核) の Hilbert 多項式が 0 になる. よって, ϕ は同型. \square

Corollary 1.2.1. E が安定な接続層とすると, $\text{End}(E)$ は k 上の有限次元可除環となっている. 特に k が代数閉体なら, $\text{End}(E) = k$ となる.

proof. $\text{Hom}(E, E)$ は接続層なので, その大域切断 $\text{End}(E)$ は k 上有限次元線型空間. また, E は安定なので, $\phi \in \text{End}(E)$ は 0 か可逆である. k が代数閉体なら, $x \in \text{End}(E)$ を k に付け加えた拡大体は k 自身になるので, $x \in k$ がわかる. \square

Definition 1.2.4. $E \in \text{Coh}(X)$ が幾何学的に安定であるとは, 任意の拡大体 K/k について, 基底変換 $X_K \rightarrow X$ による引き戻し E_K が X_K 上安定であることを指す.

半安定の方はこの条件は半安定性と同値であることを Harder-Narasimhan フィルトレーションの一意性の系として後で見る.

安定性の議論は代数曲線上のベクトル束の文脈で初めて現れた. X を種数 g の非特異射影曲線として, E を X 上の階数 r のベクトル束とする. この時, Riemann Roch の定理から,

$$\chi(E) = \int_X \text{ch}(E) \text{td}(TX) = \deg(E) + r(1 - g)$$

となる. よって, Hilbert 多項式は

$$P(E, m) = r \deg(X)m + \deg(E) + r(1 - g) = r(\deg(X)m + \frac{\deg(E)}{r} + 1 - g)$$

となる. したがって, $\mu(E) = \frac{\deg(E)}{r}$ とおけば, E が (半) 安定であることと, 任意の非自明な部分ベクトル束 $F \subset E$ について, $\mu(F) \leq \mu(E)$ となることが同値である (命題 1.2.3 の (2) 参照). この $\mu(E)$ は E の slope と呼ばれる量である. この安定性は Mumford-竹本安定性として高次元においても一般化される.

Definition 1.2.5. E を次元 $d = \dim(X)$ の接続層とする. この時,

$$\deg(E) := \alpha_{d-1}(E) - \text{rk}(E)\alpha_{d-1}(\mathcal{O}_X)$$

と定め, E の X の偏極 H に関する次数という. また, E の slope は,

$$\mu(E) := \frac{\deg(E)}{\text{rk}(E)}$$

として定義される.

Remark 1.2.3. X が既約かつ被約の時, $H \in |\mathcal{O}_X(1)|$ として,

$$\begin{aligned} \chi(E(m)) &= \int_X \text{ch}(E)(1 + mH + \frac{1}{2}m^2H^2 + \cdots)(1 + \frac{1}{2}c_1(X) + \cdots) \\ &= \text{rk}(E) \cdot \frac{\deg(X)}{d!} m^d + \frac{(\text{rk}(E)c_1(X) + 2c_1(E) \cdot H^{d-1})}{2(d-1)!} m^{d-1} + \cdots \end{aligned}$$

より, $\alpha_{d-1}(E) = \frac{(\mathrm{rk}(E)c_1(X)+2c_1(E).H^{d-1})}{2}$ である. よって,

$$\deg(E) = \int_X c_1(E).H^{d-1}$$

であることがわかった.

Definition 1.2.6. (X, L) を偏極多様体とする. 上の接続層が Mumford-竹本 (半) 安定であるとは, $T_{d-1}(E) = T_{d-2}(E)$ であり¹, 任意の非自明な部分層 $F \subset E$ について, $\mu(F) \leq \mu(E)$ となることである.

Proposition 1.2.5. $E \in \mathrm{Coh}(X)$ が純であるとする. この時, 以下が成立する.

$$MT \text{ 安定} \implies GM \text{ 安定} \implies GM \text{ 半安定} \implies MT \text{ 半安定}$$

proof. MT 安定は Hilbert 多項式の上から 2 項のみを見ているので, 明らか. \square

Remark 1.2.4. (MT-/GM-) 安定性の定義は一般には偏極に依存する. 曲線の場合は MT 安定性が偏極に依存しないので, 依存しない.

Proposition 1.2.6. X が整とする. X 上の接続層が MT 半安定かつ次数と階数が互いに素だったとすると, E は MT 安定になる.

proof. $0 \neq F \subset E$ について, $\mu(F) = \mu(E)$ なら, $\deg(F)\mathrm{rk}(E) = \deg(E)\mathrm{rk}(F)$. この式と仮定から, $\mathrm{rk}(F)$ は $\mathrm{rk}(E)$ の倍数となる. よって, $F = E$ となるしかない. \square

Example 1.2.1 ((半) 安定なベクトル束の例). (半) 安定なベクトル束の例をいくつか挙げていく. 簡単のため, X は非特異射影曲線とする.

- 任意の直線束は安定である (これは命題 1.2.3(2) からわかる).
- L_1, L_2 を X 上の直線束として, $\deg(L_1) + 1 = \deg(L_2)$ とする. $0 \rightarrow L_1 \rightarrow F \rightarrow L_2 \rightarrow 0$ を非自明な拡大とする. $\mathrm{rk}(F) = 2$ であり, $\deg(F) = 2\deg(L_1) + 1$ なので, $\mu(F) = \deg(L_1) + \frac{1}{2}$ である. $M \subset F$ を飽和な部分層とすると, $\mathrm{rk}(M) = 1$ または $\mathrm{rk}(F) = 2$ である. $\mathrm{rk}(M) = 2$ の時は $M = F$ となる. $\mathrm{rk}(M) = 1$ の時は, $M \subset L_1$ か, $M \rightarrow L_2$ が単射である [$\because K = \mathrm{Ker}(M \rightarrow L_2)$] とする. $M/K \subset L_2$ なので, L_2 が純なことから M は直線束であることから $\dim(K) < \dim(X)$ または $K = M$. 前者の場合は M が直線束 (特に純) であることから, $K = 0$ がわかる. よって, $K = M$ または $K = 0$. 前者の場合, $M \subset L_1$ で後者の場合は $M \subset L_2$.
 $\mu(F) = \deg(L_1) + \frac{1}{2}$ で, $\mu(L_1) = \deg(L_1)$ なので, 前者の場合, $\mu(M) = \deg(M) \leq \deg(L_1) < \mu(F)$ となる. 後者の場合, $M = L_2$ なら $F = L_1 \oplus L_2$ となり, 仮定に反する. L_2 は安定なので, $\mu(M) < \mu(L_2)$ となり, $\mu(M) \leq \mu(L_2) - 1 = \mu(L_1) < \mu(F)$ がわかる. よって, F は安定である.
- 上の議論から, 上の L_1, L_2 について, $F = L_1 \oplus L_2$ は半安定ではあることがわかった.
- 同様の議論で, 安定でないが単純なベクトル束も作れる. X を閉体 k 上の種数 $g \geq 2$ の非特異射影曲線として, E_1, E_2 をそれぞれ階数 r_1, r_2 の互いに同型でない安定ベクトル束で, $\mu(E_1) = \mu(E_2)$ (したがって $p(E_1) = p(E_2)$) とする. すると, 命題 1.2.4 より, $\mathrm{Hom}(E_2, E_1) = 0$ となる. したがって,

$$\dim(\mathrm{Ext}^1(E_2, E_1)) = h^1(E_2^\vee \otimes E_1) = -\chi(E_2^\vee \otimes E_1) = r_1 r_2 (g - 1)$$

¹これは d 次元以下の接続層のなす $\mathrm{Coh}(X)$ の充満圏 $\mathrm{Coh}(X)_d$ を, その Serre 部分圏 $\mathrm{Coh}(X)_{d-2}$ で割った圏 $\mathrm{Coh}(X)_{d,d-1}$ における pure object であるということである.

となる。よって、非自明な拡大 $0 \rightarrow E_1 \rightarrow E \rightarrow E_2 \rightarrow 0$ が存在する。 E の真の部分層 F をとると、 $0 \rightarrow E_1 \cap F \rightarrow F \rightarrow F/(E_1 \cap F) \rightarrow 0$ があって、

$$\begin{aligned}
P(F) &= P(E_1 \cap F) + P(F/(E_1 \cap F)) \\
&\leq \text{rk}(E_1 \cap F)p(E_1) + (\text{rk}(F) - \text{rk}(E_1 \cap F))p(E_2) \\
&= \text{rk}(F)p(E_2) + \text{rk}(E_1 \cap F)(p(E_1) - p(E_2)) \\
&= \text{rk}(F)p(E_2) \\
P(E) &= \text{rk}(E_1)p(E_1) + (\text{rk}(E) - \text{rk}(E_1))p(E_2) \\
&= \text{rk}(E)p(E_2) + \text{rk}(E_1)(p(E_1) - p(E_2)) \\
&= \text{rk}(E)p(E_2)
\end{aligned}$$

より、 $p(F) \leq p(E)$ がわかる。つまり、 E は半安定である。しかし、 $E_1 \subset E$ は $\mu(E_1) = \mu(E)$ となるので、これは安定ではない。しかし、実はこれは単純であることが示せる。 $\phi: E \rightarrow E$ を非自明な準同型としよう。すると、 E_1 と E_2 は同型でないことから、 $E_1 \rightarrow E \xrightarrow{\phi} E \rightarrow E_2$ は 0 になるので、 $\phi(E_1) \subset E_1$ となることがわかる。 E_1 は単純なので、 $\phi|_{E_1} = \lambda \cdot 1_{E_1}$ となる $\lambda \in k$ が存在する。 $\psi := \phi - \lambda \cdot 1_E$ とする。 $\psi|_{E_1} = 0$ なので、 ψ は $E_2 = E/E_1$ を経由する。

$\psi': E_2 \rightarrow E$ をその射とする。 $E_2 \xrightarrow{\psi'} E \rightarrow E_2$ が 0 でなければ、これは同型なので、逆が取れる。これは ψ' と合成して $0 \rightarrow E_1 \rightarrow E \rightarrow E_2 \rightarrow 0$ の分裂を与えるので、これが非自明な拡大であったことに矛盾。よって、 $\psi'(E_2) \subset E_1$ 。しかし再び E_1 と E_2 は同型でない安定束であることから、 $\psi' = 0$ がわかる。したがって、 $\psi = 0$ 。つまり $\phi = \lambda \cdot 1_E$ であることがわかった。

- 単純なベクトル束であって半安定ですらないものも存在する。 X を閉体 k 上の種数 $g \geq 3$ の非特異射影曲線とすると、 $\text{Pic}^1(X) \cong \text{Pic}^0(X)$ は g 次元の多様体で、そのうち大域切断が存在するものは $X \rightarrow \text{Pic}^1(X); p \mapsto [\mathcal{O}(p)]$ の像で、これは 1 次元なので、特に次数 1 の直線束で、大域切断を持たないものが取れる。これを L とおく。Riemann-Roch より、

$$\dim \text{Ext}^1(\mathcal{O}_X, L) = h^1(X, L) = g - 2 > 0$$

となるので、 $\text{Ext}^1(\mathcal{O}_X, L) \neq 0$ 。よって、非自明な拡大

$$0 \rightarrow L \rightarrow E \rightarrow \mathcal{O}_X \rightarrow 0$$

が存在する。 $\mu(E) = 1/2$ で、 $\mu(L) = 1$ なので、これは半安定ではない。以下の完全列を考える

$$0 \rightarrow \text{Hom}(E, L) \rightarrow \text{Hom}(E, E) \rightarrow \text{Hom}(E, \mathcal{O}_X)$$

まず、 E を定義する完全列に $\text{Hom}(-, L)$ して、完全列

$$0 \rightarrow H^0(L) \rightarrow \text{Hom}(E, L) \rightarrow H^0(\mathcal{O}_X) \rightarrow \text{Ext}^1(\mathcal{O}_X, L) = H^1(L)$$

を得るので、 $h^1(L) > 0$ 及び $H^0(L) = 0$ と、 E が非自明な拡大なので、 $H^0(\mathcal{O}_X) \rightarrow H^1(L)$ が単射になることから、 $\text{Hom}(E, L) = 0$ がわかる。さらに、 E を定義する完全列に $\text{Hom}(-, \mathcal{O}_X)$ をすると、

$$0 \rightarrow H^0(\mathcal{O}_X) \rightarrow \text{Hom}(E, \mathcal{O}_X) \rightarrow H^0(-L) = 0$$

となるので、 $\text{Hom}(E, \mathcal{O}_X)$ は 1 次元であることがわかった。 $\text{Hom}(E, E) \rightarrow \text{Hom}(E, \mathcal{O}_X)$ は単射であることがわかっているので、 $\text{Hom}(E, E) = k$ がわかった。

1.3. Harder-Narashimhan フィルトレーション. 射影的スキーム上の任意の純な接続層は, 半安定層によるフィルトレーションをもつ. 最も基礎的な例は以下の定理である:

Theorem 1.3.1. \mathbb{P}^1 上のベクトル束は直線束の直和に一意にかける.

proof. ベクトル束の階数に関する帰納法を用いる. 階数 1 の時は明らか. 階数 r 未満では命題が成立することを仮定する. \mathbb{P}^1 上の階数 r のベクトル束 E をとる. E の階数 1 の部分層 F をとってくる (E をたくさん捻って, $H^0(E(m)) \neq 0$ とする. $0 \neq s \in H^0(E(m))$ をとってきて, $s\mathcal{O}_{\mathbb{P}^1} \subset E(m)$ をとってくる. すると, $s\mathcal{O}_{\mathbb{P}^1}(-m) \subset E$ は階数 1 の部分加群層である). F の飽和化をとると, E/F は捩れなしの部分層になる. \mathbb{P}^1 は 1 次元であることから, E/F はベクトル束になる. よって, F も直線束になる. Serre の消滅定理から, $\mathcal{O}(a) \subset E$ となる a のうち, 最大の a が取れる. これを a_0 とおこう. 帰納法の仮定から, $E/F = \bigoplus_{i=1}^{r-1} \mathcal{O}(a_i)$ とかける. 短完全列

$$0 \rightarrow \mathcal{O}(a_0) \rightarrow E \rightarrow \bigoplus_{i=1}^{r-1} \mathcal{O}(a_i) \rightarrow 0$$

について, $\text{Ext}^1(\mathcal{O}(a_0+1), \mathcal{O}(a_0)) = H^1(\mathcal{O}(-1)) = 0$ なので,

$$\text{Hom}(\mathcal{O}(a_0+1), E) = H^0(E(-a_0-1)) \cong \bigoplus_{i=1}^{r-1} H^0(\mathcal{O}(a_i - a_0 - 1))$$

となる. しかし, a_0 は $\text{Hom}(\mathcal{O}(a), E) \neq 0$ となる最大の a だったので, 左辺は 0. よって, 右辺も 0 となる. つまり, 任意の $1 \leq i \leq r-1$ で, $a_i \leq a_0$ となる. よって, $\text{Ext}^1(\mathcal{O}(a_i), \mathcal{O}(a_0)) = H^1(\mathcal{O}(a_0 - a_i)) = 0$ となる. つまり,

$$E \cong \bigoplus_{i=0}^{r-1} \mathcal{O}(a_i)$$

となることがわかった. これはすなわちあるベクトル空間 V_a たちが存在して,

$$E \cong \bigoplus_{a \in \mathbb{Z}} V_a \otimes \mathcal{O}(a)$$

となることを示している. 次に一意性を示す. これは上の表示の V_a が同型を除いて一意であることを示せば良い. E_a を自然な射 $H^0(E(a)) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}^1}(-a) \rightarrow E$ の像とくと, 任意の a で, $E_{a-1} \subset E_a$ で, 十分大きな a で $E_a = E$ となり, 十分小さな a で $E_a = 0$ となる. つまり (E_a) は有限長の E のフィルトレーションを作る. また, $E = \bigoplus_{a \in \mathbb{Z}} V_a \otimes \mathcal{O}(a)$ とかけるとすると, $E_a = \bigoplus_{b \geq a} V_b \otimes \mathcal{O}(b)$ となり, したがって $\dim(V_a) = \text{rk}(E_a/E_{a+1})$ がわかり, 一意性が示された. \square

Corollary 1.3.1. \mathbb{P}^1 上の半安定な層は, 0 次元の層か, あるいは $\mathcal{O}(a)^{\oplus r}$ の形のもののしかない.

proof. 0 次元の場合は明らか. 1 次元の場合は, 定理 1.3.1 の形に分解し, slope をみる (\mathbb{P}^1 は 1 次元なので, 捩れなしであることとベクトル束になることは同値であることに注意). \square

この定理を体上の射影的スキームの上の純な接続層に拡張したのが Hardar-Narashimhan フィルトレーションである.

Definition 1.3.1. $(X, \mathcal{O}_X(1))$ を k 上の偏極が固定された射影的スキームとして, $E \in \text{Coh}(X)$ を次元 d の非自明かつ純な接続層とする. この時, E の Hardar-Narashimhan

フィルトレーション (HNF と略すことにする) とは, フィルトレーション

$$0 = \mathrm{HN}_0(E) \subset \cdots \subset \mathrm{HN}_l(E) = E$$

で, $\mathrm{gr}_i^{\mathrm{HN}} = \mathrm{HN}^i(E)/\mathrm{HN}^{i-1}(E)$ が半安定であり, さらに $\mathrm{gr}_i^{\mathrm{HN}}$ の簡約 Hilbert 多項式 p_i たちが $p_{\max} = p_0 > p_1 > \cdots > p_l = p_{\min}$ となるものを指す.

E が半安定であることと, $p_{\max} = p_{\min}$ であることは同値である. また, p_{\max}, p_{\min} という記法にはアプリオリにはフィルトレーションに関する不定性があるが, 以下の定理によって, この記法は問題ないことがわかる.

Theorem 1.3.2 (Harder-Narashimhan). 体 k 上の代数的スキーム X 上の純な接続層 E は HNF を一意にもつ.

証明には以下の補題を使う

Lemma 1.3.1. 定理 1.3.2 の状況において, E の部分層 F で, 任意の E の部分加群層 G について, $p(G) \leq p(F)$ かつ, $p(G) = p(F)$ ならば $G \subset F$ となるものがただ一つ存在する.

Definition 1.3.2. 上の補題の F を極大脱安定化部分層 (maximal destabilizing subsheaf) という.

proof. E の 0 でない接続部分層全体の集合を \mathfrak{S} とおいて, \mathfrak{S} の順序関係を $F_1 \leq F_2 \iff F_1 \subset F_2 \wedge p(F_1) \leq p(F_2)$ によって定める. Zorn の補題から, \mathfrak{S} は極大元をもつ. 極大元全体の中で, α_d の最も小さいものを F とおく. ここで, $d = \dim E$ である.

Step 1 $G \subset E$ で, $p(G) \geq p(F)$, $G \not\subset F$ となるものが存在したとする. この時, $p(G \cap F) > p(G) \geq p(F)$ となる.

proof. 短完全列 $0 \rightarrow G \cap F \rightarrow G \oplus F \rightarrow G + F \rightarrow 0$ を考える. まず, F の \leq -極大性から, $p(F) > p(G + F)$ となる. さらに,

$$\begin{cases} P(G) + P(F) = P(F \cap G) + P(F + G) \\ \alpha_d(F) + \alpha_d(G) = \alpha_d(F + G) + \alpha_d(F \cap G) \end{cases}$$

となるので,

$$\begin{aligned} & (\alpha_d(F) - \alpha_d(F + G))(p(F) - p(G)) \\ &= \alpha_d(F \cap G)(p(F \cap G) - p(G)) + \alpha_d(F + G)(p(F + G) - p(F)) \end{aligned}$$

となる. 左辺は非負で, $p(F + G) < p(F)$, $\alpha_d(F + G) > 0$ なので, $p(F \cap G) > p(G) \geq p(F)$

Step 2 次に, $G \subset F$ で, $p(G) > p(F)$ となるものが存在すると仮定する. G を F の部分層の中で \leq -極大なものに置き換えても支障ない. G' を, $G \leq G'$ かつ E の部分層の中で \leq -極大なものとする. すると, F の次数最小性から, $G' \not\subset F$ となる. すると, 再び Step 1 から, $p(G) \leq p(G') < p(G' \cap F)$ かつ, $G \subset G' \cap F$ より, $G < G' \cap F$ となる. これは G の取り方に矛盾. \square

proof of Theorem 1.3.2.

存在性 α_d による帰納法. $\alpha_d(E) = 0$ のとき, $E = 0$ なので明らか. $\alpha_d < n$ で存在が示されたと仮定する. E が半安定であるときは明らか. E が半安定でないとする. $\alpha_d(E) = n$ として, E の極大脱安定化部分層を F とおく. F の飽和化を \bar{F} とすると, $F \neq \bar{F}$ なら, $p(F) < p(\bar{F})$ となるので, $F = \bar{F}$ がわかる. よって, E/F は純で, α_d . よって, E/F は HNF を持つ. これを $0 = \bar{E}_0 \subset \bar{E}_1 \subset \cdots \subset \bar{E}_r = E/F$ として, $p : E \rightarrow E/F$ を自然な商とし

て, $E_0 = 0$, $E_{i+1} := p^{-1}(E_i)$ ($i = 0, 1, \dots, r$) と定める. $0 \rightarrow F \rightarrow E_2 \rightarrow E_2/F \rightarrow 0$ と, $p(F) > p(E_2)$ から, $p(E_2/F) < p(E_2) < p(F)$ となる. よって, $0 = E_0 \subset E_1 \subset E_2 \subset \dots \subset E_{r+1} = E$ は HNF である.

一意性 こちらも α_d による帰納法. $\alpha_d = 0$ の時は良い. $\alpha_d < n$ で示されたとする. $\alpha_d(E) = n$ として, E の 2 つの HNF $0 \subset E_1 \subset \dots \subset E_r = E$, $0 \subset E'_1 \subset \dots \subset E'_s = E$ が取れたとする. $E_1 \subset E'_i$ となる最小の i をとると, $E_1 \rightarrow E'_i \rightarrow E'_i/E'_{i-1}$ は半安定層の間の非零な射なので, $p(E_1) \leq p(E'_i/E'_{i-1}) \leq p(E'_1)$. ここで, $p(E'_i/E'_{i-1}) = p(E_1)$ が成立するのは $i = 1$ のときのみである. E_* と E'_* を逆にして同じ議論をすると, $E_1 = E'_1$ を得る. E/E_1 に帰納法の仮定を適用することで, 一意性が示される. \square

Corollary 1.3.2. E, F を X 上純な接続層として, $p_{\max}(F) < p_{\min}(E)$ とする. この時, $\text{Hom}(E, F) = 0$ となる.

proof. E の $\text{HNF}(E_*)$ と F の $\text{HNF}(F_*)$ を取る.

- $\phi : E \rightarrow F$ について, まず ϕ の E_1 への制限 $\phi_1 : E_1 \rightarrow F$ は 0 になることを示す. $\phi(E_1) \subset F_i$ となる最小の i を取ってくる. $i \neq 0$ と仮定しよう. $E_1 \xrightarrow{\phi} F_i \rightarrow F_i/F_{i-1}$ とすると, $p(E_1) = p_{\max}(E) > p_{\min}(F) \geq p(F_i/F_{i-1})$ なので, $\phi(E_1) \subset F_{i-1}$ となって, i の取り方に矛盾. よって $\phi|_{E_1} = 0$.
- 次に, $\phi|_{E_i} = 0$ が示されたとしよう. すると, ϕ は E/E_i を経由する. 誘導された射 $\phi_i : E/E_i \rightarrow F$ について, 同様の議論を行うと, $\phi|_{E_{i+1}} = 0$ が示される. よって, 主張が示された. \square

Mumford-竹本安定性に関しても全く同様の方法で HNF が一意に存在することが示せる. HNF の一意性はかなり強力な結果を生み出す. 以下, これをいくつか見ていこう.

Theorem 1.3.3. E を体 k 上射影的スキーム上の純な接続層とする. また, K/k を体の拡大とする. この時, $\text{HN}_*(E_K) = \text{HN}_*(E)_K$ である.

proof. E_K が半安定なら E も半安定になることは flat base change から明らか. よって, E のフィルトレーション E_i で, $\text{HN}_i(E_K) = E_i \otimes K$ となるものが存在することさえ示せば良い. $\text{HN}_i(E_K)$ は有限表示で, X_K は準コンパクトなので, ある $K/L/k$ で, L/k は有限次拡大体であり, さらに $\text{HN}_i(E_K)$ は X_L 上の接続層の基底変換で得られるものになっている. よって, K/k は有限次拡大としてしまっても良い. K/k をフィルタリングして, $K = k(x)$ の場合に示せば良い. 以下の 2 つの場合に場合わけして示す.

- K/k が純超越拡大あるいは分離拡大の場合: E_K の部分加群が E の部分加群の基底変換になっているのは, $G = \text{Aut}_k(K)$ の作用で不変なとき, そしてその時のみである. 任意の $g \in G$ について, $g(\text{HN}(E_K))$ はまた E_K の HNF になっているので, HNF の一意性から, まず, $\text{HN}_1(E_K) = E_1 \otimes K$ となる $E_1 \subset E$ が存在する. これが極大脱安定化部分層であることは $E_1 \otimes K = \text{HN}_1(E_K)$ であることから明らか. E/E_1 でもう一度同じことをやって, $E_1 \subset E_2 \subset E$ で, $E_2 \otimes K = \text{HN}_2(E_K)$ となる E_2 が取れる. これを繰り返して主張が示される.
- K/k が純非分離拡大で, $x^p \in k$ ($p := \text{char}(k)$) の場合. Jacobson descent から, $E \otimes K$ の部分加群が E の部分加群の基底変換になっていることは, $A = \text{Der}_k(K)$ の作用で不変であることと同値である. $\delta \in A$ としよう. $F = \text{HN}_i(E_K)$ について,

$$\phi : F \rightarrow E_K \xrightarrow{\delta} E_K \rightarrow E_K/F$$

として ϕ を考えると, $f \in \mathcal{O}_{X_K}(U)$, $s \in F(U)$ について,

$$\delta(fs) = f\delta(s) + \delta(f)s = f\delta(s) \pmod{F}$$

となるので, ϕ は \mathcal{O}_{X_K} 加群の準同型. Corollary 1.3.2. によって, $\phi = 0$ がわかる. よって, この場合も HNF は下降する. \square

Corollary 1.3.3. E を k 上射影的スキーム X 上の半安定な接続層として, K/k を体の拡大とする. この時, E_K も半安定である. \square

Example 1.3.1 (安定だが幾何学的安定でない接続層). $X = \text{Proj}(\mathbb{R}[x_0, x_1, x_2]/(x_0^2 + x_1^2 + x_2^2))$ とする. \mathbb{H} を四元数体とする. この時, 左 $\mathbb{H} \otimes \mathcal{O}_X$ -加群の射

$$\phi : \mathbb{H} \otimes \mathcal{O}_X(-1) \rightarrow \mathbb{H} \otimes \mathcal{O}_X$$

を, 右から $I \otimes x_0 + J \otimes x_1 + K \otimes x_2$ を掛けるものとする. $F = \text{Cok}(\phi)$ とする. F の左 $\mathbb{H} \otimes \mathcal{O}_X$ -加群構造から, \mathbb{R} -代数の準同型 $\mathbb{H} \rightarrow \text{End}(F)$ が存在する. \mathbb{H} は斜体なので, これは単射で, $\dim_{\mathbb{R}}(\text{End}(F)) \geq \dim_{\mathbb{R}}(\mathbb{H}) = 4$ がわかる. これを複素化する. まず,

$$i : \mathbb{P}_{\mathbb{C}}^1 = \text{Proj}(\mathbb{C}[u, v]) \cong X_{\mathbb{C}} = \text{Proj}(\mathbb{C}[x_0, x_1, x_2]/(x_0^2 + x_1^2 + x_2^2))$$

を,

$$x_0 \mapsto \frac{1}{2}(u^2 + v^2), \quad x_1 \mapsto \sqrt{-1}uv, \quad x_2 \mapsto \frac{\sqrt{-1}}{2}(u^2 - v^2)$$

によって定める. すると, $i^*\mathcal{O}_X(1) = \mathcal{O}_{\mathbb{P}^1}(2)$ となる. $\mathbb{H} \otimes_{\mathbb{R}} \mathbb{C} \cong M_2(\mathbb{C})$ が,

$$I = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad J = \begin{pmatrix} \sqrt{-1} & 0 \\ 0 & -\sqrt{-1} \end{pmatrix}, \quad K = \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{-1} \\ \sqrt{-1} & 0 \end{pmatrix}$$

によって定まるので, この同一視をすると, $\phi_{\mathbb{C}}$ は,

$$\phi_{\mathbb{C}} = \begin{pmatrix} -u \\ v \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v & u \end{pmatrix}$$

となる. ${}^t(-u, v) : M_2(\mathbb{C}) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}^1} \rightarrow \mathbb{C}^2 \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}^1}$ は全射なので, $i^*F_{\mathbb{C}} = \text{Cok}(\phi_{\mathbb{C}})$ は, $(-u, v) : \mathbb{C}^2 \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}^1}(-1) \rightarrow M_2(\mathbb{C}) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}^1}$ の余核と一緒にある. これを計算すると, $\text{Cok}(\phi_{\mathbb{C}}) \cong \mathcal{O}_{\mathbb{P}^1}(1)^{\oplus 2}$ となる. よって, $F_{\mathbb{C}}$ は半安定であり, $\text{End}(F_{\mathbb{C}}) = \text{End}(\mathcal{O}(1)^{\oplus 2}) = M_2(\mathbb{C})$ となる. もちろん $F_{\mathbb{C}}$ は安定ではない. 次に F は安定であることを示す. 仮に F が安定でなければ, F の真の部分 \mathcal{O}_X -加群層 L で, $p(F) \leq p(L)$ となるものがある. F は半安定なので, この L は飽和 (したがって X は一次元であることから直線束) であり, $p(F) = p(L)$ となる. $L' = F/L$ とおくとこれも直線束で, $p(F) = p(L)$ になっている. つまり $\deg(L) = \deg(L')$ なので, $L \cong L'$ でないかぎり, $\text{Ext}^1(L', L) = H^1(L \otimes (L')^{-1}) = 0$ となる. よって, $L \not\cong L'$ なら $F = L \oplus L'$. この場合は $\dim \text{End}(F) = 2$ となるので矛盾. よって, $\text{Ext}^1(L', L) = H^1(\mathcal{O}_{\mathbb{P}^1}) = 0$ となる. つまり $F \cong L^{\oplus 2}$ がわかる. したがって, $\text{End}(F) \cong M_2(\mathbb{R}) \not\cong \mathbb{H}$ となるので, これも矛盾. よって, F は安定である.

1.4. 具体例. 本節では, 標数 0 の体 k 上の射影空間 \mathbb{P}_k^n 上の余接束 $\Omega_{\mathbb{P}^n}$ が安定であることをみる. これは, のちに Flenner-Mehta-Ramanathan の制限定理を示すのに用いる.

k を標数 0 の代数閉体として, V を $n+1$ 次元 k -線型空間とする. 射影空間 $\mathbb{P}(V)$ の上の余接束 $\Omega_{\mathbb{P}(V)}$ に関連したベクトル束の列を調べる. まず, Euler 完全列

$$(1) \quad 0 \rightarrow \Omega_{\mathbb{P}(V)}(1) \rightarrow V^{\vee} \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}(V)} \rightarrow \mathcal{O}_{\mathbb{P}(V)}(1) \rightarrow 0$$

を考える.

Lemma 1.4.1. A を可換環, L, M, N を平坦 A 加群とする. 短完全列 $0 \rightarrow L \rightarrow M \rightarrow N \rightarrow 0$ を考える. この時, 任意の $m > 0$ について, 誘導される射 $S^m M \rightarrow S^m N$ は全射であり, その核は $y_1 \dots y_{m-1} z$, $y_i \in M$, $z \in L$ によって生成される.

proof. 前半の全射性は明らか. 後半について, 非可換次数付き環の準同型 $\phi : T^* M \rightarrow T^* N$ を考える. この核は $T^* M$ の次数付き両側イデアルである. これを I^* とする. $I^0 = 0$, $I^1 = L$ である. $m < m_0$ について, I^m が $y_1 \otimes \dots \otimes y_{m-1} \otimes y_m$, ($y_i \in L$ for some i) で生成されていたとする. $T^{m_0}(\phi) : T^{m_0} M = M \otimes_A T^{m_0-1} M \rightarrow N \otimes_A T^{m_0-1} N = T^{m_0} N$ は $(N \otimes T^{m_0-1}(\phi)) \circ (\phi \otimes T^{m_0-1} M)$ と分解できる. したがって, この核は, $\phi \otimes 1$ で送った時に $\text{Ker}(1 \otimes T^{m_0-1} \phi)$ に入っているもの全体である. つまり,

$$\text{Ker}(T^{m_0} \phi) = (\phi \otimes T^{m_0-1} M)^{-1} \left(\bigoplus_{i=2}^{m_0} N \otimes M \otimes \dots \otimes \overset{i}{L} \otimes \dots \otimes M \right) = \bigoplus_{i=1}^{m_0} M \otimes \dots \otimes \overset{i}{L} \otimes \dots \otimes M$$

となることがわかった. 適切に商を取ると主張が示される. \square

ここから, 例えば L を k 上代数的スキーム X 上の直線束, F, G をベクトル束として, $0 \rightarrow L \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow 0$ という短完全列があったとすると, 短完全列

$$(2) \quad 0 \rightarrow L \otimes_{\mathcal{O}_X} S^{m-1} F \rightarrow S^m F \rightarrow S^m G \rightarrow 0$$

が導かれる. この双対を取ると, 今 k の標数が 0 なので, $(S^m F)^\vee = S^m(F^\vee)$ などが成立して,

$$0 \rightarrow S^m(G^\vee) \rightarrow S^m(F^\vee) \rightarrow S^{m-1}(F^\vee) \otimes L^\vee \rightarrow 0$$

が成立する. 完全列 1 の双対がちょうど完全列 2 になるようにしてこれを適用することで, $d > 0$ について完全列

$$(3) \quad 0 \rightarrow S^d(\Omega(1)) \rightarrow S^d(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}} \xrightarrow{\delta_d} S^{d-1}(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}(1) \rightarrow 0$$

を得る. 層の射 δ_d^i を,

$$\delta_d^i = \delta_{d-i+1}(i-1) \dots \delta_{d-1}(1) \delta_d : S^d(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}} \rightarrow S^{d-i}(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}(i)$$

として定め, $K_d^i := \text{Ker}(\delta_d^i)$ とおく. $K_d^1 = \text{Ker} \delta_d = S^d(\Omega(1))$ であり, $0 = K_d^0 \subset K_d^1 \subset K_d^2 \subset \dots \subset K_d^{d+1} = S^d(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}$ となる.

Lemma 1.4.2. $0 < i < j < d$ とする.

(1) 自然な同型 $K_d^j / K_d^i \cong K_{d-i}^{j-i}(i)$ となる.

(2) さらに, $j = i+1$ の時, 短完全列 $0 \rightarrow K_d^i \rightarrow K_d^j \rightarrow K_{d-i}^{j-i}(i) \rightarrow 0$ は分裂しない.

proof. (1) は明らか. (2) について, $j = i+1$ の時, $K_{d-i}^1(i) = S^{d-i}(\Omega(1))(i)$ なので, $\text{Hom}(S^{d-i}(\Omega(1))(i), K_d^{i+1}) = 0$ を示せば良い. $K_d^{i+1} \subset S^d V \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}$ なので, $\text{Hom}(S^{d-i}(\Omega(1))(i), S^d(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}) = 0$ を示せば良い. 短完全列

$$0 \rightarrow S^{d-i}(\Omega(1))(i) \rightarrow S^{d-i}(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}(i) \rightarrow S^{d-i-1}(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}(i+1) \rightarrow 0$$

に, $\text{Hom}(-, S^d(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}})$ を当てて, 完全列

$$0 = \text{Hom}(S^{d-i}(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}(i), S^d(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}) \rightarrow \text{Hom}(S^{d-i}(\Omega(1))(i), S^d(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}) \rightarrow \text{Ext}_{\mathbb{P}}^1(S^{d-i-1}(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}(i+1), S^d(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}) = 0$$

を得るので, 真ん中の項である $\text{Hom}(S^{d-i}(\Omega(1))(i), S^d(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}})$ も 0 である. \square

Lemma 1.4.3. K_d^i のスロープについて, 以下が成立する:

- (1) $\mu(S^d(\Omega(1))) = -\frac{d}{n}$
- (2) $\mu(K_d^1) < \mu(K_d^2) < \dots < 0$

proof.

(1) $\mathrm{rk} S^d V \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}} = \binom{n+d}{d}$ となるので,

$$\mu(S^d(\Omega(1))) = \frac{-\binom{n+d-1}{d-1}}{\binom{n+d}{d} - \binom{n+d-1}{d-1}} = -\frac{d}{n}$$

となる.

(2)

$$\mu(K_d^{i+1}/K_d^i) = \mu(S^{d-i}(\Omega(1))(i)) = -\frac{d}{n} + i \left(1 + \frac{1}{n}\right)$$

となるので, $\mu(K_d^{i+1}/K_d^i)$ は単調増加. ここで, 以下の補題を示す:

Lemma 1.4.4. E_0, E_1, E_2 を k 上代数的スキーム X 上の純 $\dim(X)$ 次元の
接続層として, 以下の短完全列

$$0 \rightarrow E_0 \rightarrow E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow 0$$

を考える. この時, 以下の 3 条件は同値である.

- (a) $\mu(E_0) < \mu(E_2)$
- (b) $\mu(E_0) < \mu(E_1)$
- (c) $\mu(E_1) < \mu(E_2)$

proof.

$$\begin{aligned} & \mu(E_0) < \mu(E_1) \\ \iff & \frac{\deg(E_0)}{\mathrm{rk}(E_0)} < \frac{\deg(E_0) + \deg(E_2)}{\mathrm{rk}(E_0) + \mathrm{rk}(E_2)} \\ \iff & \deg(E_0)\mathrm{rk}(E_2) < \deg(E_2)\mathrm{rk}(E_0) \\ \iff & \mu(E_0) < \mu(E_2) \end{aligned}$$

より, (a) と (b) の同値性がわかる. 同様の計算で, (a) と (c) の同値性も示せる. \square

上の補題と完全列

$$0 \rightarrow K_d^1 \rightarrow K_d^2 \rightarrow K_{d-1}^1(1) \rightarrow 0$$

から, $\mu(K_d^1) < \mu(K_d^2) < \mu(S^{d-1}(\Omega(1))(1))$ がわかる. $\mu(K_d^i) < \mu(K_d^{i+1}) < \mu(S^{d-i}(\Omega(1))(i))$ を仮定する. この時, 完全列

$$0 \rightarrow K_d^{i+1} \rightarrow K_d^{i+2} \rightarrow S^{d-i-1}(\Omega(1))(i+1) \rightarrow 0$$

について, $\mu(K_d^{i+1}) < \mu(S^{d-i}(\Omega(1))(i)) < \mu(S^{d-i-1}(\Omega(1))(i+1))$ となるので, 再び補題から, $\mu(K_d^{i+1}) < \mu(K_d^{i+2}) < \mu(S^{d-i-1}(\Omega(1))(i+1))$ がわかる. 以上より, $\mu(K_d^1) < \mu(K_d^2) < \dots < \mu(S^d(V^\vee) \otimes \mathcal{O}_{\mathbb{P}}) = 0$ がわかった. \square

$\mathbb{P}(V)$ には $\mathrm{SL}(V)$ の作用が入る. また, $\mathrm{SL}(V)$ は $\mathcal{O}(1)$, Ω などにも自然に (右から) 作用し, Euler 系列 1 は $\mathrm{SL}(V)$ -同変な系列であることがわかる. したがって, 系列 3 も同様に $\mathrm{SL}(V)$ 同変な系列である.

Lemma 1.4.5. $S^d(\Omega(1))$ は真の $\mathrm{SL}(V)$ -不変な部分層は存在しない.

proof. $\mathrm{SL}(V)$ は $\mathbb{P}V$ に推移的に作用するので, 不変部分層はベクトル束になる. 超曲面 $W \subset V^\vee$ に対応する点 $x \in \mathbb{P}V$ について, x のイソトロピー部分群 $\mathrm{SL}(V)_x$ は W を固定する ($\mathrm{SL}(V)_x$ の元を V^\vee の元の右から合成することで V^\vee に作用が入るが, W は x に対応する線型空間を 0 に飛ばすもの全体からなるからである). 全射反

準同型 $\mathrm{SL}(V)_x \rightarrow \mathrm{GL}(W)$ ができる. ここから, $S^d(\Omega(1))(x) = S^d W^2$ に $\mathrm{SL}(V)_x$ (や $\mathrm{GL}(W)$) の右 (左) 作用が入る. 仮定より $G(x)$ はこの作用で不変である. しかし, $\mathrm{GL}(W) \rightarrow \mathrm{GL}(S^d W)$ は既約表現³なので, 非自明な不変部分空間を持たない. したがって, $G = 0$ または $G = S^d(\Omega(1))$ となる. \square

Lemma 1.4.6. $S^d V \otimes \mathcal{O}$ の不変部分空間は K_d^i のみである.

proof. $d = 0$ の場合は明らか. $d > 0$ として, $d' < d$ については補題が成立すると仮定する. $G \subset S^d V \otimes \mathcal{O}$ を真の不変部分層とする. この時, $G_i := G \cap K_d^i \subset K_d^i$ と置くと, δ_d^i は $\mathrm{SL}(V)$ 同変なので, K_d^i は不変部分層である. したがって G_i も不変部分層. 同様に, $\bar{G}_i = G_i / G_{i-1} \subset S^{d-i+1}(\Omega(1)) \otimes \mathcal{O}(i-1)$ も不変部分層である. i を $G_i \neq 0$ となる最小の i とする. $i > 1$ ならば, $G_i \cong \bar{G}_i \neq 0$ なので, ひとつ前の補題から, $\bar{G}_i = S^{d-i+1}(\Omega(1)) \otimes \mathcal{O}(i-1)$ となる. しかし, この同型は完全列

$$0 \rightarrow K_d^{i-1} \rightarrow K_d^i \rightarrow S^{d-i+1}(\Omega(1)) \otimes \mathcal{O}(i-1) \rightarrow 0$$

の分裂を与える. これは補題 1.4.2(2) に矛盾する. よって, $i = 1$ である. $K_d^1 = S^d(\Omega(1))$ の不変部分層は自明なものしかないので, $G_1 = K_d^1$ となる. $\nu \geq 1$ は $G_\nu = K_\nu^\nu$ となる最大の ν とすると, $G = G_\nu$ なら話は終わっている. そうでないなら, $G' = G/G_\nu$ は $S^d V \otimes \mathcal{O}/K_\nu^1 = S^{d-\nu} V \otimes \mathcal{O}(\nu)$ の不変部分層となるので, 帰納法の仮定から, $G_{\nu+1} = G_{\nu+1}/G_\nu = K_{d-\nu}^1(\nu)$ となるので, $G_{\nu+1} = K_d^{\nu+1}$ となる. これは ν の取り方に矛盾. \square

以上から, 以下の定理が導かれる:

Theorem 1.4.1. K_d^i たちは半安定であり, $\Omega(1)$ は安定である.

proof. K_d^i の HNF は $\mathrm{SL}(V)$ の作用で不変なので, 特に脱安定化部分層もそうである, しかし, $i > j$ ならば $\mu(K_d^i) < \mu(K_d^j)$ なので, $p(K_d^i) < p(K_d^j)$ であり, 補題 1.4.6 から, K_d^i は半安定であることがわかる. また, $\mu(\Omega(1)) = -\frac{1}{n}$ であり, 命題 1.2.6 より, $\Omega(1)$ は安定であることがわかる. \square

1.5. Jordan-Hölder フィルトレーション. HNF は純な接続層を半安定な接続層の直和に分解していた. Jordan-Hölder フィルトレーションは半安定な接続層を安定層によってフィルトレーションするものである.

Definition 1.5.1. E を体 k 上の偏極多様体 (X, L) 上の半安定な接続層とする. この時, E の Jordan-Hölder フィルトレーションとは, フィルトレーション

$$0 = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_N = E$$

で, $i = 1, \dots, N$ について, E_i/E_{i-1} は $p(E_i/E_{i-1}) = p(E)$ なる安定層であるようなもののことを言う.

Jordan-Hölder フィルトレーションの存在性は以下のようにして言える: $E (\neq 0)$ を半安定な接続層として, $E_1 \subset E$ を, $p(F) = p(E)$ となる部分加群層 $F \subset E$ の中で $\alpha_d(F)$ が最小なものとする. この時, E_1 は E の飽和な部分層で, E_1 は安定, さらに $p(E) = p(E/E_1)$ となる. フィルトレーション $0 = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_i$ で, 任意の j について, $p(E_j) = p(E_j/E_{j-1}) = p(E)$ かつ E_j/E_{j-1} が安定なものが取れた時, $E_i = E$ ならこれは Jordan-Hölder フィルトレーションになる. $E_i \neq E$ なら, $\bar{E}_{i+1} \subset E/E_i$ を, $p(\bar{E}_{i+1}) = p(E/E_i) = p(E)$ となるような部分加群層の中で α_d が最小のものとして, E_{i+1} を商 $E \rightarrow E/E_i$ による \bar{E}_{i+1} の引き戻しとすると, $p(E_{i+1}) = p(E)$ であり, さらに, E_{i+1}/E_i は安定になる. これでフィルトレーション

² $\Omega(1)$ は代入写像 $V^\vee \otimes \mathcal{O}(-1) \rightarrow \mathcal{O}$ の核なので, $\Omega(1)(x) = W$ である.

³ここでも標数 0 の仮定を使っている.

$0 = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_{i+1}$ がえられる. $\alpha_d(E_0) < \alpha_d(E_1) < \cdots \leq \alpha_d(E)$ となるので, この操作は有限でとまり, Jordan-Hölder フィルトレーション $0 = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_N = E$ を得る.

HNF とは異なり, Jordan-Hölder フィルトレーションは一意には定まらない. これは例えば 2 つの同型な直線束の直和などを考えれば良い. しかし, もう少し弱い形の一意性は持つことがわかる:

Theorem 1.5.1. E を半安定接続層, $0 = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_l = E$, $0 = E'_0 \subset E'_1 \subset \cdots \subset E'_{l'} = E$ を E の 2 つの Jordan-Hölder フィルトレーションとする. この時, $l = l'$ であり,

$$\bigoplus_{i=1}^l E_i/E_{i-1} \cong \bigoplus_{j=1}^{l'} E'_j/E'_{j-1}$$

となる.

Definition 1.5.2. 上の定理の状況で, $\text{gr}(E) := \bigoplus_{i=1}^l E_i/E_{i-1}$ と定める.

proof. α_d に関する帰納法を使う. $\alpha_d(E) = 0$ の時は明らか, E を半安定な接続層として, $\alpha_d(F) < \alpha_d(E)$ なる半安定な接続層 F については主張が成立すると仮定する. $j > 0$ を, $E_1 \subset E'_j$ となる j の中で最小なものとする. この時, $E_1 \rightarrow E'_j/E'_{j-1}$ は非自明な射で, $E_1, E'_j/E'_{j-1}$ は安定で, $p(E_1) = p(E'_j/E'_{j-1})$ なので, これは同型である. したがって, $E'_j \cong E'_{j-1} \oplus E_1$ がわかった. したがって, 以下の完全列がある:

$$0 \rightarrow E'_{j-1} \xrightarrow{i} E/E_1 \xrightarrow{\pi} E/E'_j$$

この時, E/E_1 には二つの Jordan-Hölder フィルトレーションが取れる: まず一つは $0 = E_1/E_1 \subset E_2/E_1 \subset \cdots \subset E_l/E_1 = E/E_1$ であり, もう一つは $0 \subset i(E'_1) \subset \cdots \subset i(E'_{j-1}) \subset \pi^{-1}(E'_{j+1}/E'_j) \subset \cdots \subset \pi^{-1}(E'_{l'}/E'_j)$ である. これらのフィルトレーションの長さはそれぞれ $l-1, l'-1$ であり, $\alpha_d(E/E_1) < \alpha_d(E)$ なので, 帰納法の仮定から $l = l'$ がわかる. また, $k \geq j$ について, $\pi^{-1}(E'_{k+1}/E'_j)/\pi^{-1}(E'_k/E'_j) = E'_{k+1}/E'_k$ などから,

$$\bigoplus_{i=2}^l E_i/E_{i-1} \cong \bigoplus_{k \neq j} E'_k/E'_{k-1}$$

が成立する. $E_1 \cong E_j/E_{j-1}$ なので, これで主張が示された. \square

Definition 1.5.3. 二つの半安定な接続層 E, E' について, E と E' が S -同値であるとは, $\text{gr}(E) \cong \text{gr}(E')$ であることを指す.

Definition 1.5.4. 半安定層 E が多重安定であるとは, E が安定層の直和になっていることを指す.

定義から, 半安定層の S -同値類はただ一つの多重安定層を含む. あとで見るように, 半安定層のモジュライはその S -同値類をパラメトライズしているものなので, これは多重安定層のモジュライと考えることもできる.

Proposition 1.5.1. 任意の半安定層 E は唯一の $p(E) = p(F)$ な極大多重安定部分加群 F を持つ. これを E の *socle* という.

proof. 極大多重安定部分加群の存在は良い. 一意性を α_d に関する帰納法で示す. $\alpha_d(E) = 0$ の場合は明らか. $\alpha_d(E') < \alpha_d(E)$ となる半安定層 E' については命題が示されているとする. $F, F' \subset E$ をともに E の極大多重安定部分加群とする. この時, 二つの Jordan-Hölder フィルトレーション $0 = F_0 \subset \cdots \subset F_l = F \subset F_{l+1} \subset \cdots \subset F_n = E$, $0 = F'_0 \subset \cdots \subset F'_{l'} = F' \subset F'_{l'+1} \subset \cdots \subset F'_n = E$ が取れる. $F_1 \subset F'_k$ となる最小の

k を j とおくと, $F_1 \rightarrow F'_j/F'_{j-1}$ は同型である. したがって, $F'_j \rightarrow F'_j/F'_{j-1}$ は分裂をもち, したがって, $j \leq l'$, つまり $F_1 \subset F'$ がわかる. F/F_1 および F'/F_1 は E/E_1 の極大多重安定部分加群なので, 帰納法の仮定から $F/F_1 = F'/F_1$, したがって $F = F'$ が示される. \square

Definition 1.5.5. 半安定層 E について, E の extended socle とは, E の半安定部分加群層 F' で, $p(E) = p(F')$ かつ $\text{gr}(F')$ の任意の直和因子が E の socle F のある直和因子と同型になり, そのような性質を持つ部分加群層の中で極大なもののことである.

Proposition 1.5.2. E を半安定層とする.

- (1) $F \subset E$ を E の extended socle とする. この時, $\text{Hom}(F, E/F) = 0$ である.
- (2) E の extended socle は一意に存在する.

proof.

- (1) F の Jordan-Hölder フィルトレーションを延長して E の Jordan-Hölder フィルトレーション E_* を作る. $E_i = F$ とおく. $\phi: F \rightarrow E/F$ を非自明な射とすると, ある $j \leq i$ で, $\phi(E_j) \neq 0$ となる最小のものが取れる. $\phi(E_j) \subset E_k/F$ となる最小の $k > i$ をとってくる. すると, ϕ の E_j への制限は非自明な射 $E_j/E_{j-1} \rightarrow E_k/E_{k-1}$ を誘導するが, これは F が extended socle であることに反する.
- (2) F, F' を二つの extended socle とする. $F \neq F'$ なら, $F' \not\subset F$ として良い. すると, $F' \subset E \rightarrow E/F$ によって, 非自明な射 $F' \rightarrow E/F$ が作れる. 一方で, $\text{gr}(F')$ の直和因子と $\text{gr}(E/F)$ の直和因子で同型なものはないので, (1) と同様な理由から $\text{Hom}(F', E/F) = 0$ となってしまう. これは矛盾 \square

Corollary 1.5.1. E を半安定層とする. この時, socle および extended socle は (X, E) の群作用で不変である. また, E が単純かつ半安定かつ extended socle が E 自身になっているなら, E は安定である.

proof. 最初の主張は明らか. E が安定でないとする. E は単純なので, E が socle と等しくなることはない. E の socle を F とする. E の Jordan-Hölder フィルトレーション $0 = E_0 \subset \dots \subset E_l = E$ の最後の部分を見ると, E/E_{l-1} は F の直和因子と同型なので, 非自明な射 $\psi: E \rightarrow E/E_{l-1} \rightarrow F \subset E$ を得る. しかし $\psi^2 = 0$ なので, $\text{End}(E)$ の単純性に矛盾する. \square

Theorem 1.5.2. E を単純層とする. この時, E が安定であることと, 幾何学的安定であることは同値である.

proof. 定理 1.3.3 の証明と同様にして, 体の拡大 K/k について, E_K の extended socle は E の extended socle の基底変換と等しいことがわかる. したがって, 系 1.5.1 から, E_K も安定であることがわかる. \square

1.6. μ -安定性. (X, L) を偏極多様体とする.

Definition 1.6.1. $d \leq \dim(X)$ とする. 圏 $\text{Coh}_d(X)$ を, $\text{Coh}(X)$ の充満部分圏で, $E \in \text{Coh}_d(X) \iff \dim(E) \leq d$ となるものとする.

$0 \leq d' \leq d \leq \dim(X)$ について, $\text{Coh}_{d'}(X)$ は $\text{Coh}_d(X)$ の Serre 部分圏である. したがって, 圏 $\text{Coh}_{d,d'}(X)$ を以下のように定義できる:

Definition 1.6.2. $0 \leq d' \leq d \leq \dim(X)$ とする. 圏 $\text{Coh}_{d,d'}(X)$ を, Serre 商 $\text{Coh}_d(X)/\text{Coh}_{d'-1}(X)$ として定義する. $E \in \text{Coh}_{d,d'}(X)$ が純であるとは, $T_{d-1}E \cong 0$ (in $\text{Coh}_{d,d'}(X)$) となることを指す.

$E \in \text{Coh}(X)$ について, $\dim(E) \leq d' - 1$ ならば, $\deg(P(E)) < d'$ となることに注意すると, $E \in \text{Coh}_{d,d'}(X)$ について, 多項式

$$P_{d,d'}(E) = \frac{\alpha_d(E)}{d!} m^d + \cdots + \frac{\alpha_{d'}(E)}{d'!} m^{d'}$$

が, $\text{Coh}_{d,d'}(X)$ の同型によらず定義できる. ここで, $\alpha_d(E) \neq 0$ となるような E について,

$$p_{d,d'}(E) := \frac{P_{d,d'}(E)}{\alpha_d(E)}$$

と定め, これを $E \in \text{Coh}_{d,d'}(X)$ の簡約 Hilbert 多項式と言う.

Definition 1.6.3. $E \in \text{Coh}_{d,d'}(X)$ が (半) 安定であるとは, E が純であり, 任意の E の部分加群 F について $p_{d,d'}(F) (\leq) p_{d,d'}(E)$ となることを指す.

Lemma 1.6.1. $j < i$ とする. この時, $E \in \text{Coh}(X)$ を $\dim(E) = d$ なる純な接続層とすると, E が $\text{Coh}_{d,i}(X)$ の対象として安定 $\implies E$ が $\text{Coh}_{d,j}(X)$ の対象として安定 $\implies E$ が $\text{Coh}_{d,j}(X)$ の対象として半安定 $\implies E$ が $\text{Coh}_{d,i}(X)$ の対象として半安定となる. \square

Example 1.6.1. $d = \dim(X)$, $d' = d - 1$ のとき,

$$P_{d,d-1}(E) = \frac{\deg(X) \text{rk}(E)}{d!} m^d + \frac{(2c_1(E) - \text{rk}(E)K_X \cdot H^{n-1})}{2(d-1)!} m^{d-1}$$

となる. したがって,

$$\hat{\mu}(E) := \frac{\alpha_{d-1}(E)}{\alpha_d(X)} = \frac{1}{\deg(X)} \left[\mu(E) - \frac{1}{2}(K_X \cdot H^{n-1}) \right]$$

とおくと, $E \in \text{Coh}_{d,d-1}(X)$ が (半) 安定であることと, $T_{d-1}(E) = T_{d-2}(E)$ かつ任意の $F \subset E$ について, $\hat{\mu}(F) (\leq) \hat{\mu}(E)$ となることは同値である. つまり, E が (半) 安定であることと, E が μ -(半) 安定であることは同値である.

Example 1.6.2. $d = \dim(X)$, $d' = 0$ の時, $E \in \text{Coh}(X)$ の (半) 安定性は Gieseker-丸山 (半) 安定性と同値である.

前節まででやった定理は少し証明を直せば $\text{Coh}_{d,d'}(X)$ の中での安定性に関しても同じようなことが言える. 特に, 以下の 2 つの定理が成立する:

Theorem 1.6.1.

- (1) (HNF) E を $\dim(E) = d$ な接続層で, $\text{Coh}_{d,d'}(X)$ の対象として純であるとする. この時, フィルトレーション

$$0 = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_N = E$$

が存在して, E_i/E_{i-1} は $\text{Coh}_{d,d'}(X)$ の対象として半安定であり, $p_{d,d'}(E_1) > p_{d,d'}(E_2/E_1) > \cdots > p_{d,d'}(E_N/E_{N-1})$ となる. さらに, このフィルトレーションは $\text{Coh}_{d,d'}$ の対象として (つまり $d' - 1$ 次元以下の部分加群の差異を除いて) 一意である.

- (2) (JHF) $E \in \text{Coh}_{d,d'}(X)$ が半安定であるとする. この時, $\text{Coh}_{d,d'}(X)$ におけるフィルトレーション

$$0 = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_N = E$$

で, 各 E_i/E_{i-1} は $\text{Coh}_{d,d'}(X)$ の対象として安定であり, $p_{d,d'}(E_i/E_{i-1}) = p_{d,d'}(E)$ となる. また, このフィルトレーションの $\text{gr}(E_*)$ はフィルトレーションによらずに $\text{Coh}_{d,d'}(X)$ の対象として同型をのぞき一意に定まる.

μ -安定性の話にフォーカスしよう. (X, L) を d 次元正規偏極多様体としよう. この時, 上の定理のフィルトレーションは μ -HNF および μ -JHF と呼ばれる. もし E が $\text{Coh}(X)$ の対象として振れなしならば, 全ての E_i/E_{i-1} が torsion free であるようにしてフィルトレーションを定めると HNF は一意に定まる. しかし, (2) の $\text{gr}(E)$ は余次元 2 を除いた部分でしか定まらない. E が振れなしならば, (2) のフィルトレーションにおける E_i/E_{i-1} も振れなしになるようにとれる (各 E_i を飽和化しても, $\mu(E_i) = \mu(E)$ かつ E は半安定となることから, JHF であることがわかる.). したがって, $\text{gr}(E_*)$ は振れなしとして良い. また, 振れなしの接続層 E について, 自然な射 $\theta : E \rightarrow E^{\vee\vee}$ は単射かつ $\text{Coh}_{d,d-1}$ の同型になるので, 定理 A.0.2 と合わせると $\text{gr}(E_*)^{\vee\vee}$ は一意に定まることがわかる.

Definition 1.6.4. E を正規射影多様体 (X, L) 上の振れなし接続層で, 半安定であるとする. この時, E_* を E の JHF として, $\text{gr}(E) := \text{gr}(E_*)^{\vee\vee}$ と定める.

純な $E \in \text{Coh}_{d,d'}(X)$ について, 多重安定性も以下のように定義できる:

Definition 1.6.5. $E \in \text{Coh}_{d,d'}(X)$ を純な対象とする. この時, E が多重安定であるとは, E が半安定であり, $p_{d,d'}(E_i) = p_{d,d'}(E)$ なる安定層 $E_i \in \text{Coh}_{d,d'}(X)$ が存在して, $E \cong \bigoplus_i E_i$ とかけることとする.

E がベクトル束の時, 系 A.0.1 およびベクトル束の直和因子もまたベクトル束になっていること (と, 余次元 2 の閉集合を除いて同型な二つの反射的層は同型であること) から, 以下の命題が得られる:

Proposition 1.6.1. E を射影正規多様体 (X, L) 上のベクトル束とする. E が μ -多重安定であることと, $\mu(E_i) = \mu(E)$ なる安定な部分束 E_i が存在して, $E = \bigoplus_i E_i$ となることは同値である. また, E が多重安定の時, 飽和な部分層 $F \subset E$ が $\mu(F) = \mu(E)$ を満たすならば, F は E の直和因子である.

proof. 最初の主張はすでに示した. E が多重安定とする. この時, $F \subset E$ を飽和な部分層で, $\mu(F) = \mu(E)$ を満たし, F が安定であったとする. すると, F から始まる JHF を考えることで, F が反射的であることから, F は $\text{gr}(E) = E$ の直和因子であることがわかる. 次に, $F \subset E$ を飽和な部分層で, $\mu(F) = \mu(E)$ となるとする. この時, F の JHF の第一成分 F_1 について, 今得た結果を使うことで, F_1 は E の直和因子であることがわかる. したがって, F_1 で割って E の階数に関する帰納法を回すと後半の主張が得られる. \square

1.7. 有界性. 本節では, moduli の構成に必要な有界性定理の概説をする. 本節は主に [3] を参考にしている.

Definition 1.7.1. S を Noether スキーム, $f : X \rightarrow S$ を有限型の射とする.

- (1) $s \in S$ について, 2 つの体の拡大 $K, K'/k(s)$ を見る. $X_K := S \times_S \text{Spec}(K)$ 上の接続層 F_K と, $X_{K'}$ 上の接続層 $F_{K'}$ が同値であるとは, ある体の埋め込み $\phi : K \rightarrow L$ と $\psi : K' \rightarrow L$ が存在して, X_L 上で $(F_K)_L \cong (F_{K'})_L$ となることである.
- (2) f のファイバー上の接続層の族 \mathcal{F} が有界であるとは, ある有限型の射 $T \rightarrow S$ と, X_T 上の接続層 E が存在して, 任意の $F \in \mathcal{F}$ は, ある $E_t := E|_{X_t}$, $(t \in T)$ と同値になることをいう.

Remark 1.7.1. 定理 1.7.1 の (2) について, 条件は T の点における剰余体にしかよらないので, T を被約化して, 初めから T は被約であるとしてしまって良い. そうすると, general flatness から, T の稠密開集合 U が存在して, $E|_U$ は S 上平坦になる. ここで, T を $U \sqcup (T - U)$ に置き換えて E をこれに引き戻しても良い. T の次元による帰納法で, E は S 上平坦であるようにできることがわかる.

Theorem 1.7.1. S を *Noether* スキーム, $f : X \rightarrow S$ を射影的射として, $\mathcal{O}_X(1)$ を f -豊富な可逆層とする. また, \mathcal{F} を f のファイバー上の接続層の族として, これが有界であると仮定する. この時, ある N が存在して, 任意の $n \geq N$ 及び任意の $F \in \mathcal{F}$ について, $F(n)$ は大域切断で生成され, $H^i(X_K, F(n)) = 0$ ($i > 0$) となる.

proof. 仮定から, $T \rightarrow S$ を有限型の射として, $E \in \text{Coh}(X_T)$ を T 上平坦な接続層として, $\mathcal{F} = \{E_t \mid t \in T\}$ として良い. $\mathcal{O}_X(1)$ は f -豊富なので, ある N が存在して, $n \geq N$ ならば $R^i f_{T,*}(E(n)) = 0$ ($\forall i > 0$) かつ $f_T^* f_{T,*}(E(n)) \rightarrow E(n)$ は全射なる. すると, E は T 上平坦なので, Base change theorem から, 任意の $t \in T$ で,

$$(R^i f_{T,*} E(n)) \otimes k(t) \rightarrow H^i(X_t, E_t(n))$$

は同型, つまり $H^i(X_t, E_t(n)) = 0$ ($\forall i > 0$) かつ $f_{T,*}(E(n)) \otimes k(t) \rightarrow H^0(X_t, E_t(n))$ は同型になる. また, $f_T^* f_{T,*}(E(n)) \otimes \mathcal{O}_{X_t} = f_T^*(f_{T,*}(E(n)) \otimes k(t))$ なので,

$$f_T^*(f_{T,*}(E(n)) \otimes k(t)) = H^0(X_t, E_t(n)) \otimes \mathcal{O}_{X_t} \rightarrow E_t(n)$$

が全射になることがわかる. したがって主張が示された. \square

本節の目標はこの定理の逆を示すことである.

Definition 1.7.2. k を代数閉体, X を k 上の射影的スキームとして, $\mathcal{O}_X(1)$ を X 上の非常に豊富な直線束とする. この時, X 上の接続層 E が m -正則であるとは, 任意の正の整数 p について, $H^p(X, E(m-p)) = 0$ が成立することと定める. また,

$$\text{reg}(E) := \inf\{m \in \mathbb{Z} \mid E \text{ は } m\text{-正則}\}$$

と定める.

今, k は無限体なので, $H \in |\mathcal{O}_X(1)|$ を E に付随する点を通らないようにとれる. したがって, 完全列

$$(4) \quad 0 \rightarrow E(-1) \rightarrow E \rightarrow E|_H \rightarrow 0$$

を得る.

Proposition 1.7.1. 上の完全列において, E が m -正則とすると, $E|_H$ も m -正則である.

proof. 上の完全列に $\mathcal{O}(m-p)$ を掛けてコホモロジーの長完全列を考えると, $p > 0$ について,

$$H^p(X, E(m-p)) \rightarrow H^p(X, E|_H(m-p)) \rightarrow H^{p+1}(X, E(m-p-1))$$

を得るが, 両端は 0 なので, 真ん中も 0 である. \square

Proposition 1.7.2. $E \in \text{Coh}(X)$ が m -正則とする. この時, $n \geq m$ について, 以下が成立する:

- (1) E は n -正則である.
- (2) 自然な射 $H^0(E(n)) \otimes H^0(\mathcal{O}(1)) \rightarrow H^0(E(n+1))$ は全射である
- (3) $E(n)$ は大域切断で生成される.

proof.

Step 1 (1), (2) を $\dim(E)$ に関する帰納法で示す. $\dim(E) = 0$ の時は明らか. $E \in \text{Coh}(X)$ について, 短完全列 4 を考える. 命題 1.7.1 から, $G := E|_H$ は m -正則である. したがって, 帰納法の仮定から, $n \geq m$ について, G は n -正則でもある. すると,

$$H^p(E(n-p-1)) \rightarrow H^p(E(n-p))$$

は全射になり, 全射の列

$$H^p(E(m-p)) \rightarrow H^p(E(m+1-p)) \rightarrow \cdots \rightarrow H^p(E(n-p))$$

を得る. したがって, $H^p(E(n-p)) = 0$. 次に以下の図式を考える:

$$\begin{array}{ccccccc} & & H^0(E(n)) \otimes H^0(\mathcal{O}(1)) & \longrightarrow & H^0(G(n)) \otimes H^0(\mathcal{O}(1)) & \longrightarrow & 0 \\ & \nearrow & \downarrow & & \downarrow & & \\ H^0(E(n)) & \longrightarrow & H^0(E(n+1)) & \longrightarrow & H^0(G(n+1)) & \longrightarrow & 0 \\ & & & & \downarrow & & \\ & & & & 0 & & \end{array}$$

これを追跡すると $H^0(E(n)) \otimes H^0(\mathcal{O}(1)) \rightarrow H^0(E(n+1))$ は全射であることがわかる.

Step 2 (3) を示す. 以下の図式を考える:

$$\begin{array}{ccc} H^0(E(n)) \otimes H^0(\mathcal{O}(1)) \otimes \mathcal{O}_X & \longrightarrow & H^0(E(n+1)) \otimes \mathcal{O}_X \\ \downarrow & & \downarrow \\ H^0(E(n)) \otimes \mathcal{O}(1) & \longrightarrow & E(n+1) \end{array}$$

n を十分大きくとると, $E(n+1)$ は大域切断で生成される. つまり右の縦の射は全射になる. また, $n \geq m$ なら, 上の射も全射になる. したがって, 下の射は全射である. これに $\mathcal{O}(-1)$ を掛けて $E(n)$ が大域切断で生成されていることがわかる. これで n を上から落としていくと主張が示される. \square

Proposition 1.7.3. $0 \rightarrow E(-1) \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow 0$ を, 短完全列 4 とする. G が m -正則とする. この時, 以下が成立する:

- (1) $p \geq 2$ とする. この時, 任意の $n \geq m-p$ について, $H^p(X, E(n)) = 0$ となる.
- (2) 任意の $n \geq m-1$ について, $h^1(X, E(n-1)) \geq h^1(X, E(n))$ となる.
- (3) 任意の $n \geq m-1 + h^1(X, E(m-1))$ について, $H^1(X, E(n)) = 0$ となる.

特に, E は $m + h^1(X, E(m-1))$ -正則である.

proof.

- (1) 今, $p \geq 2$ について, $n \geq m-p$ ならば $H^{p-1}(G(n+1)) = H^p(G(n+1)) = 0$ となる. したがって, $H^p(E(n)) = H^p(E(n+1))$ がわかる. よって, $H^p(E(m-p)) = H^p(E(n))$ が任意の $n \geq m-p$ で成立する. したがって, Serre の消滅定理から, $H^p(E(n)) = 0$ がわかる.
- (2) 完全列

$$H^0(G(n)) \rightarrow H^1(E(n-1)) \rightarrow H^1(E(n)) \rightarrow H^1(G(n))$$

があるが, $n \geq m-1$ なら $H^1(G(n)) = 0$ なので, $H^1(E(n-1)) \rightarrow H^1(E(n))$ は全射. よって, $h^1(E(n-1)) \geq h^1(E(n))$ となる.

- (3) $n \geq m$ として, 図式

$$\begin{array}{ccc} H^0(E(n)) \otimes H^0(\mathcal{O}(1)) & \xrightarrow{u_n \otimes 1} & H^0(G(n)) \otimes H^0(\mathcal{O}(1)) \\ \downarrow & & \downarrow v_n \\ H^0(E(n+1)) & \xrightarrow{u_{n+1}} & H^0(G(n+1)) \end{array}$$

を考える. 命題 1.7.2 (2) から, v_n は全射. ここで, u_n が全射 ($\iff H^1(E(n-1)) \rightarrow H^1(E(n))$ が単射) とすると, $v_n(u_n \otimes 1)$ も全射になるので, u_{n+1} も全射. つまり $H^1(E(n)) \rightarrow H^1(E(n+1))$ も単射になる. これを帰納的にうると, u_n が全射, つまり $H^1(E(n-1)) \rightarrow H^1(E(n))$ が単射になった時点で $H^1(E(n)) = 0$ がわかる. ところで, $n \geq m-1$ なら $H^1(G(n)) = 0$ なので, $H^1(E(n-1)) \rightarrow H^1(E(n))$ は全射である. つまり, $h^1(E(n-1)) > h^1(E(n))$ となる. これが続くのは m から数えて高々 $h^1(E(m-1))$ 回なので, $n \geq m-1 + h^1(E(m-1))$ なら $H^1(E(n)) = 0$ とならなければならない. \square

Definition 1.7.3. $E \in \text{Coh}(X)$, $r \geq \dim(E)$ とする. 非負整数の列 $(b) = (b_0, \dots, b_r)$ について, E が (b) -層であるとは, 以下のように r について帰納的に定義される:

- (1) $h^0(E(-1)) \leq b_0$ であり,
- (2) ある E -正則な $s \in H^0(\mathcal{O}(1))$ が存在して, 完全列

$$0 \rightarrow E(-1) \xrightarrow{s} E \rightarrow E/E(-1) \rightarrow 0$$

において, $E/E(-1)$ は (b_1, \dots, b_r) -層である

Remark 1.7.2. 言い換えると, $s \leq r$ 次元連接層について, E が (b) -層であることとは, E -正則列 $H_1, \dots, H_s \in |\mathcal{O}(1)|$ がとれて, $h^0(E|_{\bigcap_{j < i} H_j}(-1)) \leq b_i$ が任意の $i \leq s$ で成立することである.

Proposition 1.7.4. E を (b) -層とする. この時, E はある (b) 及び Hilbert 多項式 $P(E)$ のみから決まる定数 m について, m -正則であり, $h^0(E(a))$ は a , (b) おとび $P(E)$ のみから定まる定数によって上から抑えられる.

proof. $\dim(E)$ による帰納法で示す. $\dim(E) = 0$ の時, $\text{reg}(E) = -\infty$ であり, $h^0(E(a)) = h^0(E) = P(E, 0)$ なので OK. $\dim(E) > 0$ とする. E は (b) -層なので, ある E -正則な $H \in |\mathcal{O}(1)|$ が存在して, $E|_H$ は (b_1, \dots, b_r) -正則である. 完全列

$$0 \rightarrow E(-1) \rightarrow E \rightarrow E|_H \rightarrow 0$$

によって, $P(E|_H, n) = P(E, n) - P(E, n-1)$ となるので, 帰納法の仮定から, $E|_H$ は (b) と $P(E)$ のみからなる定数 m_1 について, m_1 -正則であることがわかる. さらに, (b) , $P(E)$ のみから定まる非負整数列 c_0, c_1, \dots が存在して, 任意の $i \geq 0$ について, $h^0(E|_H(i)) \leq c_i$ となる.

$$\begin{aligned} h^0(E(i)) &\leq h^0(E(i-1)) + h^0(E|_H(i)) \\ &\leq h^0(E(i-1)) + c_i \end{aligned}$$

となるので,

$$h^0(E(a)) \leq h^0(E(-1)) + \sum_{i=0}^a c_i \leq b_0 + \sum_{i=0}^a c_i$$

がわかる. 最右辺は (b) と $P(E)$ と a のみから定まっているので, $h^0(E(a))$ が a , $P(E)$, (b) のみから定まる定数で抑えられることが分かった. 命題 1.7.3(2) から, $p \geq 2$ の時, $H^p(E(m_1-1)) = 0$ となる. したがって,

$$h^1(E(m_1-1)) = h^0(E(m_1-1)) - P(E, m_1-1) \leq b_0 + \sum_{i=0}^{m_1-1} c_i - P(E, m_1-1)$$

となるので, 命題 1.7.3 から $\text{reg}(E)$ は (b) 及び $P(E)$ のみから定まる定数で抑えられることが分かった. \square

これで, 連接層の族が有界であることの必要十分条件を与える定理を示す準備ができた.

Theorem 1.7.2. $f: X \rightarrow S$ を Noether スキームの間の射影的射として, $\mathcal{O}_X(1)$ を f に関して非常に豊富な可逆層とする. \mathcal{F} を f のファイバー上の接続層の族とする. $P_{\mathcal{F}} := \{P(F) \mid F \in \mathcal{F}\}$ とする. この時, 以下の主張は全て同値である:

- (1) \mathcal{F} は有界である.
- (2) $P_{\mathcal{F}}$ は有限集合で, ある非負整数の列 $(b) = (b_0, \dots, b_r)$ が存在して, \mathcal{F} の任意の元の同値類はある代数閉体 K について, X_K 上の (b) -層 F_K によって代表される.
- (3) $P_{\mathcal{F}}$ は有限集合で, ある m について, 任意の $F_K \in \mathcal{F}$ は m -正則になる.
- (4) $P_{\mathcal{F}}$ は有限で, ある S 上有限型のスキーム T と, X_T 上の接続層 E が存在して,

$$\mathcal{F} \subseteq \{F \mid t: T \text{ の体値点で, } F \text{ は } E_t \text{ の商}\}$$

となる.

- (5) ある S 上有限型のスキーム T と, X_T 上の接続層 E, E' が存在して,

$$\mathcal{F} \subseteq \{\text{Cok}(\phi: E'_t \rightarrow E_t) \mid t: T \text{ の体値点, } \phi \in \text{Hom}(E'_t, E_t)\}$$

となる.

ここで, $A \subset B$ は, 任意の A の元の同値類が B の元によって代表されることを指すことにする.

proof. 全ての主張は S -local であるので, S を affine として良い. すると, $\mathcal{O}_X(1)$ は f に関して非常に豊富なので, S 上の局所自由層 E と射影埋め込み $i: X \rightarrow \mathbb{P}_S(E)$ を, $i^* \mathcal{O}_{\mathbb{P}_S(E)}(1) = \mathcal{O}_X(1)$ となるものが取れる.

- (1) \implies (2) 仮定から, ある S 上有限型の被約スキーム T と, X_T 上の接続層 E が存在して, E は T 上平坦で, 任意の \mathcal{F} の元は, ある体値点 t について, E_t で代表される (Remark 1.7.1 参照). E が T 上平坦なので, $\#\{P(E_t)\}$ は T の連結成分の個数で上から抑えられる. したがって, 示すべきことは主張を満たす非負整数の列 (b) の存在性である.

$e(E) := \max\{\dim E_t \mid t \in T\}$ として, $e = e(E)$ に関する帰納法で示す. $e = 0$ の時はコホモロジー次元の上半連続性から明らか. $e \leq a - 1$ で主張が示されているとする. $e = a$ とする. $\dim E_t < a$ となる t は T の連結成分の和集合になっている ($\dim E_t$ は E_t の Hilbert 多項式の次数である), $\dim E_t < a$ となる連結成分については, 帰納法の仮定から, 主張を満たす列 (b') を取れる. したがって, 任意の $t \in T$ について, $\dim E_t = a$ として良い. T は被約なので, base change theorem から, $f_{T,*}(\mathcal{O}_X(1)_T)$ は局所自由層になる. $t \in T$ をとる. すると, $k(t)$ の有限次拡大 K と $s \in H^0(X_K, \mathcal{O}_{X_K}(1))$ が存在して, 単射 $E_K(-1) \rightarrow E_K$ を定めるものが取れる. すると, t の開近傍の有限被覆 $U_t \rightarrow T$ と, $\tilde{s} \in H^0(U_t, f_{U_t,*}(\mathcal{O}(1)_{U_t}))$ が存在して, t の上の点 $u \in U_t$ について, $\tilde{s}(u) = s$ となるものが取れる.

短完全列

$$0 \rightarrow E(-1)_{X_u} \xrightarrow{s} E|_{X_u} \rightarrow G|_{X_u} \rightarrow 0$$

について, $G|_{X_u}$ はもちろん $K = k(u)$ 上平坦である. したがって, 完全列

$$E(-1)|_{U_t} \xrightarrow{\tilde{s}} E \rightarrow G \rightarrow 0$$

について, 定理 B.0.1 より, U_t をより小さい u の近傍に取り替えることで, \tilde{s} は U_t 上であり, さらに G は U_t 上平坦であることがわかる. このように U_t を構成すると, T のコンパクト性から有限個の U_{t_i} たちの非交和 T' が T を被覆するように取れる. T を T' と取り替え, $s \in H^0(X_T, \mathcal{O}_X(1)_T)$ が存在し

て, 任意の $t \in T$ について, s は単射 $E(-1) \rightarrow E$ を定め, その余核 G も T 上平坦になる状況に帰着できた. 今, $e(G) = e(E) - 1$ となっている. したがって, 帰納法の仮定から, ある (b_1, \dots, b_r) が存在して, 任意の $t \in T$ について, G_t は (b_1, \dots, b_r) -層である. コホモロジー次元の上半連続性から, ある b_0 について, 任意の $t \in T$ で $h^0(E(-1)|_{X_t}) \leq b_0$ となるので, $(b) = (b_0, \dots, b_r)$ とすればこれが主張を満たす (b) である.

- (2) \implies (3) これは命題 1.7.4 からすぐに従う.
 (3) \implies (4) (3) を仮定すると, 任意の $F \in \mathcal{F}$ について, 命題 1.7.2 から, $F(m)$ は大域切断で生成されており, $H^i(F(m)) = 0$ ($i > 0$) となる. したがって, $M := \max\{P(F, m) \mid F \in \mathcal{F}\}$ として, $T = S$, $E = \mathcal{O}_X(-m)$ とすれば良い.
 (4) \implies (5) (4) を仮定する. \mathcal{F} の元はある E_t の商と同値なので, それを F とおくと, ある $t \in T$ について, 短完全列

$$0 \rightarrow F' \rightarrow E_t \rightarrow F \rightarrow 0$$

を得る. (1) \implies (2) の証明から, $\{P(E_t) \mid t \in T\}$ は有限集合で, ある数列 (b) が存在して, $\{E_t \mid t \in T\}$ は (b) -層の族である. $P_{\mathcal{F}}$ も有限集合なので, このようにとった F' たちのなす族 \mathcal{F}' についても, $P_{\mathcal{F}'}$ は有限集合で, \mathcal{F}' は E_t の部分層のなす族なので, これも (b) -層の族になっている. したがって, (2) \implies (3) から, \mathcal{F}' の正則性は上から抑えられることがわかる. すると, (3) \implies (4) から, \mathcal{F}' の任意の元はある $E' \in \text{Coh}(X)$ の S の体値点での引き戻しの商でかけることがわかるので, (5) を得る.

- (5) \implies (1) $\{E'_t \mid t \in T\}$ は有界性の定義から明らかに有界である. したがって, (1) \implies (4) から, ある m, M が存在して, 任意の $t \in T$ について, ある全射 $\psi_t : \mathcal{O}_X(-m)^{\oplus M} \rightarrow E'_t$ がある. m を十分大きくとって, $H^i(E(m)) = 0$ ($\forall i > 0$) として良い. 任意の $F \in \mathcal{F}$ は, ある $\phi : E'_t \rightarrow E_t$ について,

$$F = \text{Cok}(\phi : E'_t \rightarrow E_t) = \text{Cok}(\phi\psi_t)$$

と書けるので, E' を $\mathcal{O}_{X_T}(-m)^{\oplus M}$ と置き換えて良いことがわかる.

$$H_0 := \text{Hom}_{\mathcal{O}_{X_T}}(E', E) \cong E(m)^{\oplus M}$$

とする. m の取り方から, $H^i(H_{0,t}) = 0$ ($\forall i > 0$) となるので,

$$\begin{cases} H := f_{T,*}H_0 \text{ は局所自由} \\ H_y \cong \text{Hom}_{\mathcal{O}_{X_y}}(E'_y, E_y) \quad (\forall y \in T) \end{cases}$$

が成立する. $\mathbf{H} := \text{Spec}_T(\text{Sym}^*(H^\vee))$ として, $\Phi \in H^0(H_{\mathbf{H}})$ を tautological な切断とする. この時, 以下の図式

$$\begin{array}{ccc} X_{\mathbf{H}} & \xrightarrow{f_{\mathbf{H}}} & \mathbf{H} \\ g \downarrow & & \downarrow \bar{g} \\ X_T & \xrightarrow{f_T} & T \end{array}$$

に関して, base change theorem を用いると,

$$\begin{aligned} H^0(\mathbf{H}, H_{\mathbf{H}}) &\cong H^0(\mathbf{H}, \bar{g}^* f_{T,*} H_0) \\ &\cong H^0(\mathbf{H}, f_{\mathbf{H},*} g^* H_0) \\ &\cong H^0(X_{\mathbf{H}}, g^* H_0) \\ &\cong H^0(X_{\mathbf{H}}, E_{\mathbf{H}}(m)^{\oplus M}) \\ &\cong \text{Hom}_{\mathcal{O}_{X_{\mathbf{H}}}}(E'_{\mathbf{H}}, E_{\mathbf{H}}) \end{aligned}$$

となり, Φ に対応するのは普遍射である. これも Φ において, $\tilde{F} := \text{Cok}(\Phi)$ とおくと, \tilde{F} は \mathcal{F} を bound する. したがって, \mathcal{F} は有界であることがわかった. \square

この定理を用いて例えば以下のことがわかる:

Corollary 1.7.1. X を k 上一次元非特異射影曲線とする. この時, X 上の Hilbert 多項式一定の半安定連接層全体のなす族 \mathcal{F} は有界である.

proof. 0 次元の場合は定理 1.7.2(3) から明らか. 1 次元の場合も, Serre 双対性から, 任意の $E \in \text{Coh}(X)$ について,

$$H^1(E(m-1)) = \text{Hom}(E, \omega_X(1-m))^\vee$$

となる. E が半安定なら, $\mu(E) > \deg(\omega_X(1-m))$ なら右辺は 0 なので,

$$m > \frac{2g-2-\mu(E)}{\deg(\mathcal{O}_X(1))} + 1$$

なら 0 である. 今, Hilbert 多項式が定まっているので $\mu(E)$ は定まっている. よって, E の正則性が上から抑えられて, Hilbert 多項式が一定の半安定連接層の族は有界であることがわかった. \square

Lemma 1.7.1 (Grothendieck). X を体 k 上の射影多様体として, $\mathcal{O}_X(1)$ を X 上の非常に豊富な直線束とする. E を X 上の純 d 次元の連接層とする. この時, E の純 d 次元の商 F について, $\hat{\mu}(F)$ は E の Hilbert 多項式 P と $\rho = \text{reg}(E)$ のみに依存する定数 C でしか抑えられない. さらに, 任意の C' で, E の純 d 次元の商 F で, $\hat{\mu}(F) \leq C'$ となるもの全体のなす族は有界である.

proof. まず, 射影埋め込み $j: X \rightarrow \mathbb{P}^n$ を与えて, E を j_*E とすることで, X を \mathbb{P}^n に置き換えても良いことがわかる. $\text{Supp}(E)$ と交わらない $n-d-1$ 次元線型空間 L をとって, $\pi: \text{Supp}(E) \subset \mathbb{P}^n - L \rightarrow \mathbb{P}^d$ を射影とすると, $\pi^* \mathcal{O}_{\mathbb{P}^d}(1) = \mathcal{O}_{\text{Supp}(E)}(1)$ となる. したがって, 射影公式と, π は有限射であることから, 任意の $G \in \text{Coh}(\text{Supp}(E))$ について, $\pi_* G \in \text{Coh}(\mathbb{P}^d)$ であり,

$$H^i(\pi_* G \otimes_{\mathcal{O}_{\mathbb{P}^d}} \mathcal{O}_{\mathbb{P}^d}(m)) = H^i(\pi_*(G(m))) = H^i(G(m))$$

となる. つまり, $P_G = P_{\pi_* G}$, 特に $\hat{\mu}(G) = \hat{\mu}(\pi_* G)$ および $\text{reg}(G) = \text{reg}(\pi_* G)$ が成立する. E は振れなしなので, $\pi_* E$ も振れなしである. したがって, $X = \mathbb{P}^d$, E は振れなしとして良い. 今, $\rho = \text{reg}(E)$ なので, 全射

$$\mathcal{O}_X(-\rho)^{\oplus P(\rho)} \rightarrow E$$

がある. したがって, E の商は, $G := \mathcal{O}_X(-\rho)^{\oplus P(\rho)}$ の商でもある. $\phi: G \rightarrow F$ を商とすると, $s = \text{rk}(F)$ として, generically surjective な射

$$\Lambda^s \phi: \Lambda^s G = \Lambda^s(k^{P(\rho)}) \otimes \mathcal{O}_X(-s\rho) \rightarrow \Lambda^s F = \det(F)$$

を得る. 特に,

$$\mathrm{Hom}(\Lambda^s(k^{P(\rho)}) \otimes \mathcal{O}(-s\rho), \mathcal{O}(c_1(F))) = \Lambda^s(k^{P(\rho)})H^0(\mathcal{O}(s\rho + c_1(F))) \neq 0$$

を得る. したがって,

$$s\rho + \deg(F) \geq 0$$

つまり,

$$\hat{\mu}(F) \geq -\rho + \frac{1}{2}(d+1)$$

となる. 右辺を C とおいて, 前半の主張を得る.

C' を固定して, $G \rightarrow F$ を捩れなしの商として, $\hat{\mu}(F) = C'$ とする. この時, $\mathrm{rk}(F) = s$ として,

$$\deg(F) = s \left(C' - \frac{1}{2}(d+1) \right)$$

となる. 商 $q: G \rightarrow F$ から誘導される射

$$G \otimes \Lambda^{s-1}G \xrightarrow{\wedge} \Lambda^s G \rightarrow \det(F) = \mathcal{O}(\deg(F))$$

を考える. ここから,

$$\hat{\psi}: G \rightarrow \mathcal{O}(\deg(F)) \otimes \Lambda^s G^\vee$$

が誘導されるが, $U \subset \mathbb{P}^d$ を F が自由になるような稠密開集合とすると, F は捩れなしなので S_1 で, したがって $\mathbb{P}^d - U$ は余次元 2 以上であり, 簡単な線形代数から, この核は $\mathrm{Ker}(q)|_U$ と一致することもわかるので, $\mathrm{Ker}(\hat{\psi})$ も $\mathrm{Ker}(q)$ も反射的であり, これが U 上で一致するので全体でも一致する. したがって, $\hat{\psi}(G) \cong F$. したがって, これは定理 1.7.2(5) の条件を満たす. \square

Remark 1.7.3. 上の補題から, 射影多様体 X 上の接続層 E の捩れなしの商 F は, $\hat{\mu}(F)$ を固定されればその取りうる Hilbert 多項式は有限個しかないとわかる.

APPENDIX A. 反射的層

[2] では, 反射的接続層を X が非特異 (あるいは Gorenstein) 射影多様体の時のみに定義しており, 標準的な射 $\theta: E \rightarrow E^{DD} := \mathcal{E}xt^c(\mathcal{E}xt^c(E, \omega_X), \omega_X)$ が同型であるとしている ($c = \mathrm{codim} E$). この定義は codim が高い時は確かに有用であるが, X が少しでも特異点をもつと大変である. そこで, 捩れなし接続層の場合に限り, 本 PDF では以下の定義を採用することにする (これが X が Gorenstein の場合に一致することは明らかである). なお, 本節は [1] を参考にして議論している.

Definition A.0.1. X をスキームとして, $E \in \mathrm{Coh}(X)$ を捩れなしの接続層とする. この時, E が反射的であるとは, 標準的な射 $E \rightarrow E^{\vee\vee} := \mathrm{Hom}(\mathrm{Hom}(E, \mathcal{O}_X), \mathcal{O}_X)$ が同型であることと定める.

Lemma A.0.1. X を整な Noether スキームとする. $F \in \mathrm{Coh}(X)$ を捩れなしの接続層とする. この時, 以下は同値である.

- (1) F が反射的である
- (2) 任意の $x \in X$ について, x の開近傍 U がおよび U 上の局所自由な接続層 E と捩れなしの接続層 G が存在して, $F|_U$ がある $\phi: E \rightarrow G$ の核と同型である

proof. F が反射的であるとする. $F^\vee \in \mathrm{Coh}(X)$ なので, 任意の $x \in X$ について, x の開近傍 U がおよび U 上の局所自由な接続層 E_1, E_2 が存在して,

$$E_2 \rightarrow E_1 \rightarrow F^\vee|_U \rightarrow 0$$

が完全になる。この双対をとると、完全列

$$0 \rightarrow F|_U \rightarrow E_1^\vee \rightarrow E_2^\vee$$

ができる。 $E_1^{\vee\vee} =: E$ として、 $E \rightarrow E_2^{\vee\vee}$ の像を G とすると、 G は局所自由層の部分層なので振れなしである。 よって、 $(1) \implies (2)$ が分かった。

次に、 (2) を仮定する。問題は局所的なので、 F はある局所自由層 E から振れなしの接続層 G への射の核になるとして良い。つまり、以下の完全列がある。

$$0 \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow 0$$

この二重双対を取って、 E は局所自由なので、特に反射的であることに注意すると、 $F^{\vee\vee} \rightarrow E$ がとれるが、 X の生成点 η では F_η は有限次元 $\kappa(\eta)$ -線型空間なので、 $F_\eta^{\vee\vee} = F_\eta$ となっているため、 $F_\eta^{\vee\vee} \rightarrow E_\eta$ は単射である。したがってその核は振れ層になっているが、 $F^{\vee\vee}$ は振れなしなので、これは単射であることがわかる。 F は振れなしなので、 $F \subset F^{\vee\vee}$ となるが、この包含によって全射 $G \rightarrow \text{Cok}(F^{\vee\vee} \rightarrow E)$ ができる。これも生成点では同型になっており、 G は振れなしであったことから、この射は同型である。 よって、 $F \cong F^{\vee\vee}$ がわかる。 \square

Corollary A.0.1. X を整な Noether スキーム、 E を X 上の局所自由な接続層とした時、 E の飽和な部分層は反射的になる。 \square

Proposition A.0.1. X を整な Noether スキーム、 $F \in \text{Coh}(X)$ を振れなし (この仮定はいらぬ) とする。この時、 F^\vee は反射的である。

proof. F は局所自由な接続層 E_1, E_2 の間の射 $E_2 \rightarrow E_1$ の余核になっているとして良い。すると、その双対を取って、完全列

$$0 \rightarrow F^\vee \rightarrow E_1^\vee \rightarrow E_2^\vee$$

を得るが、 $E_1^\vee \rightarrow E_2^\vee$ の像は振れなしである。 よって、補題 A.0.1 から、 F^\vee は反射的であることがわかる。 \square

Theorem A.0.1. X を正規かつ整な Noether スキームとして、 $F \in \text{Coh}(X)$ を振れなしとする。この時、以下は同値

- (1) F が反射的である。
- (2) F は S_2 条件を満たす。つまり、任意の $x \in X$ について、 $\text{depth}(F_x) \geq \min\{2, \dim(\mathcal{O}_{X,x})\}$ となる。

proof. F を反射的とする。 F は局所自由接続層 E と、振れなし接続層 G の間の全射 $F \rightarrow G$ の核になっているとして良い。つまり、以下の完全列がある

$$0 \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow 0$$

$x \in X$ を余次元 2 以上の点とする。この時、 $\text{depth}(G_x) \geq 1$ であり、 X は正規なので $\text{depth}(\mathcal{O}_{X,x}) \geq 2$ となるので、 $\text{depth}(E_x) \geq 2$ である。 よって、 $\text{depth}(F_x) \geq 2$ が分かった。 よって、 $(1) \implies (2)$ が示された。

次に、 (2) を仮定する。 F は振れなし (これは仮定からも (2) から従う) なので、 $F \rightarrow F^{\vee\vee}$ は単射。その余核を G とおく。

$$0 \rightarrow F \rightarrow F^{\vee\vee} \rightarrow G \rightarrow 0$$

$x \in X$ を余次元 1 の点とすると、 X は正規なので、 $\mathcal{O}_{X,x}$ は離散賦値環である。 よって、 F_x は自由であり、 $F_x \cong F_x^{\vee\vee}$ となる。つまり $G_x = 0$ となる。 よって、 G の台は余次元 2 以上である。 $x \in \text{Ass}(G)$ をとると、これは余次元 2 以上の点であり、 $\text{depth}(G_x) = 0$ となる。命題 A.0.1 より、 $F^{\vee\vee}$ は反射的なので、上に示したことから $\text{depth}(F_x^{\vee\vee}) \geq 2$ 。 よって、 $\text{depth}(F_x) = 1$ とならなければならないが、これは仮定に反する。 \square

Theorem A.0.2. E を正規かつ整な *Noether* スキーム X 上の捩れなし連接層とする. この時, 以下は同値である:

- (1) E が反射的 (すなわち $E \rightarrow E^{\vee\vee}$ は同型) である
- (2) 任意の開集合 $U \subset X$ と X の $\text{codim}_X Y \geq 2$ なる閉集合 Y について, 制限写像 $E(U) \rightarrow E(U - Y)$ は同型である.
- (3) 任意の余次元 2 以上の閉集合 $Y \subset X$ について, $\mathcal{H}_Y^1(E) = 0$

proof. 今, E は捩れなしであることから, $\mathcal{H}_Y^0(E) = 0$ が出ることに注意. Y を $\text{codim}_X Y \geq 2$ となる X の閉集合として, $j : X - Y \rightarrow X$ を開埋め込みとする. 完全列

$$0 \rightarrow \mathcal{H}_Y^0(E) \rightarrow E \rightarrow j_* j^* E \rightarrow \mathcal{H}_Y^1(E) \rightarrow 0$$

によって, $E \cong j_* j^* E$ であることと, $(\mathcal{H}^0(E) =) \mathcal{H}^1(E) = 0$ となることが同値であることがわかる. よって, (2) \iff (3) が分かった. (1) を仮定する. この時, 定理 A.0.1 から, 任意の余次元 2 以上の点 $x \in X$ について, $\text{depth}(E_x) \geq 2$, つまり $\mathcal{H}_x^0(E) = \mathcal{H}_x^1(E) = 0$ となる. よって, 任意の開集合 U について, $E(U) \cong E(U - \bar{x})$ が成立する. さて, $Y = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_n$ を既約分解として, n に関する帰納法で, $E(U) \rightarrow E(U - Y)$ が同型であることを示す. $n = 1$ の場合は上に示した. $n - 1$ の時主張が成立するとすると, $E(U) \rightarrow E(U - (X_1 \cup \dots \cup X_{n-1}))$ が同型で, $E(U - (X_1 \cup \dots \cup X_{n-1})) \rightarrow E(U - Y)$ も同型になるので, $E(U) \rightarrow E(U - Y)$ は同型になる. したがって, (2) が示された. (2) を仮定すると, 任意の余次元 2 以上の $x \in X$ について, $\mathcal{H}_x^0(E) = \mathcal{H}_x^1(E) = 0$ となるので, E は反射的であることがわかる. \square

APPENDIX B. 平坦性の局所的特徴づけ

Theorem B.0.1. (A, \mathfrak{m}) を *Noether* 局所環, B を *Noether* 的 A 代数, I を A のイデアルで, $IB \subset \text{Jac}(B)$ となるものとする. 有限生成 B 加群の完全列

$$M' \rightarrow M \rightarrow M'' \rightarrow 0$$

が以下の性質を満たすとする:

- (1) M は A -平坦で, $M'' \otimes_A A/I$ は A/I -平坦である.
- (2) $u \otimes_A (A/I) : M' \otimes_A A/I \rightarrow M \otimes_A A/I$ は単射である.

この時, M'' は平坦 A 加群で, u は単射である.

proof. $n > 0$ として, N を $I^n N = 0$ となる A -加群とする. この時, $u \otimes_A N : M' \otimes_A N \rightarrow M \otimes_A N$ は単射になることを n に関する帰納法で示す.

1. $n = 1$ の時, N は A/I 加群と見れる. (2) の仮定から, 短完全列

$$0 \rightarrow M'/IM' \rightarrow M/IM \rightarrow M''/IM'' \rightarrow 0$$

があり, (1) の仮定から, M''/IM'' は A/I -平坦なので,

$$M' \otimes_A N = M'/IM' \otimes_{A/I} N \rightarrow M/IM \otimes_{A/I} N = M \otimes_A N$$

は単射.

2. $m \geq 1$ として, $n < m$ の場合に主張が示されているとする. A -加群 N を, $I^m N = 0$ となるものとする. 短完全列

$$0 \rightarrow IN \rightarrow N \rightarrow N/IN \rightarrow 0$$

を考えて, M は A -平坦であることから, 以下の完全可換図式を得る:

$$\begin{array}{ccccccc} M' \otimes_A (IN) & \longrightarrow & M' \otimes_A N & \longrightarrow & M' \otimes_A (N/IN) & \longrightarrow & 0 \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\ 0 \longrightarrow & M \otimes_A (IN) & \longrightarrow & M \otimes_A N & \longrightarrow & M \otimes_A (N/IN) & \longrightarrow 0 \end{array}$$

蛇の補題から, 完全列

$$\mathrm{Ker}(u \otimes_A (IN)) \rightarrow \mathrm{Ker}(u \otimes_A N) \rightarrow \mathrm{Ker}(u \otimes_A (N/IN))$$

を得るが, 帰納法の仮定から, この両サイドは0である. したがって, $\mathrm{Ker}(u \otimes_A N) = 0$ がわかる.

N を有限 A 加群とする, $x \in \mathrm{Ker}(u \otimes_A N)$ について, 上に示したことから, 任意の $k \geq 0$ について, $\bar{x} \in M' \otimes_A (N/I^k N) = (M' \otimes_A N)/I^k(M' \otimes_A N)$ は0になることがわかる. つまり,

$$x \in \bigcap_{k \geq 0} I^k(M' \otimes_A N)$$

今, $M' \otimes_A N$ は有限 B 加群で, $I^k(M' \otimes_A N) = (IB)^k(M' \otimes_A N)$ なので, Krull の交叉定理から, これは0になる. つまり, $u \otimes_A N$ は単射であることが分かった.

$N = A$ としてこれを適用すると, u が単射であることがわかる. さらに, M の平坦性から, 任意の有限 A 加群 N について, $\mathrm{Tor}_1^A(M'', N) = 0$ がわかるので, M'' は A -平坦であることも分かった. \square

REFERENCES

- [1] Robin Hartshorne. Stable reflexive sheaves. *Mathematische Annalen*, Vol. 254, pp. 121–176, 1980.
- [2] Daniel Huybrechts and Manfred Lehn. *The Geometry of Moduli Spaces of Sheaves*. Cambridge Mathematical Library. Cambridge University Press, 2 edition, 2010.
- [3] Maruyama Masaki. *Moduli Spaces of Stable Sheaves on Schemes*. MSJ Memoirs. 2016.