数理解析研究所講究録
第 400 巻 1980 年 70-80

深さ1の素イデアルによって判定可能な性質

阪大 理学部 吉田憲一

Aをネーター的可換環で単位元を持つものとする。ここで我々は有限生成 A-加群Mについての性質の中で、特に $\Delta(M)=\{\mathfrak{p}\in \mathrm{Spec}\,A : ht\,\mathfrak{p}>1,\ depth\,M_{\mathfrak{p}}=1\}$によって判定可能な$M$に関する性質のいくつかを取り扱ってみたい。

そのためにまず$\Delta(M)$の特徴づけを行なう。そこでまず有限生成A-加群Nに対して$Ass_A(N)$を考える。

$Ass(N)\subseteq Ht_i(A)$のときNを uniform module with ht_iと呼ぼう，特に$Ass(N)=\{\mathfrak{p}\}$の時，Nは$\mathfrak{p}$に属する coprimary module と呼ばれる。

有限生成A-module Nに対して$N_i=\{n\in N : ht\ ann_A(n)\geqq i\}$と定めれば，$N_i$は$N$の submodule で，ある整数$d\geqq 0$が存在して次の減少列ができる。

$N=N\supseteq N_1\supseteq\cdots\supseteq N_d\supsetneqq N_{d+1}=(0).$

この$\{N_i\}$に関して次の命題を得る。

命題：(i) $D_i(N)=\{\mathfrak{P}\in H_i(A):\mathfrak{P}\supseteq \mathrm{Ann}\, N_i\}$ とおけば $D_i(N)=\{\mathfrak{P}\in \mathrm{Ass}(N): \mathrm{ht}\,\mathfrak{P}=i\}$，従って $\mathrm{Ass}(N)=\bigcup_{i=0}^{d} D_i(N)$ を得る。

(ii) N_i/N_{i+1} は uniform module with ht i。

(iii) $f\in A$ を N-regular element とすれば，$fN\cap N_i=fN_i$，従って $N/fN\supseteq N_i/fN_i\supseteq\cdots\supseteq N_d/fN_d$ を得る。

証明：(i) $\mathfrak{P}\supseteq \mathrm{Ann}\, N_i$ とすれば，N_i の定義及び N_i が有限生成であるから，$\mathrm{ht}\,\mathfrak{P}\geqq i$ であることが容易にわかる。従って $\mathrm{ht}\,\mathfrak{P}=i$ で $\mathfrak{P}\supseteq \mathrm{Ann}\, N_i$ とすれば $\mathfrak{P}$ は $\mathrm{Ann}\, N_i$ の minimal prime divisor であるから $\mathfrak{P}\in \mathrm{Ass}(N_i)\subseteq \mathrm{Ass}(N)$。逆に $\mathfrak{P}\in \mathrm{Ass}\, N$ で $\mathrm{ht}\,\mathfrak{P}=i$ とする。このとき $m\in N$ で $\mathrm{Ann}(m)=\mathfrak{P}$ となるものが存在するから N_i の定義より $m\in N_i$ $\therefore \mathrm{Ann}\, N_i\subseteq \mathrm{Ann}(m)=\mathfrak{P}$，従って $\mathfrak{P}\in D_i(N)$ である。

(ii) 次に $\mathrm{Ass}(N_i/N_{i+1})=D_i(N)$ を示す。$\mathfrak{P}\in D_i(N)$ とすれば，$m\in N_i$ があって $\mathrm{Ann}(m)=\mathfrak{P}$，$\bar{m}$ を m の residue class とすれば $\mathrm{Ann}(\bar{m})\supseteq \mathfrak{P}$。今 $\mathrm{Ann}(\bar{m})\supsetneqq \mathfrak{P}$ とすれば，$x\in \mathrm{Ann}(\bar{m})$，$x\notin\mathfrak{P}$ が存在する。このとき $xm\in N_{i+1}$，従って $\mathfrak{P}\neq \mathrm{Ann}(xm)$ であるが一方 $\mathrm{Ann}(xm)=\mathrm{Ann}(m):xA$ で $x\notin\mathfrak{P}$ ゆえに $\mathfrak{P}\supseteq \mathrm{Ann}(m):xA=\mathrm{Ann}(xm)$，これは矛盾。従って $D_i(N)\subseteq \mathrm{Ass}(N_i/N_{i+1})$。$\mathfrak{P}\in \mathrm{Ass}(N_i/N_{i+1})$ とする。$\bar{m}\in N_i/N_{i+1}$ があって $\mathfrak{P}=\mathrm{Ann}(\bar{m})$。$m$ を $\bar{m}$ の代表元とすれば，$m\in N_i$。$\mathfrak{P}=\mathrm{Ann}(\bar{m})\supseteq \mathrm{Ann}(m)$ で $m\in N_i$

だから $ht\,\mathfrak{P} \geqq i$。今 $ht\ \mathrm{ann}(m) > i$ とすれば $m \in N_{i+1}$ だから $\bar{m} = \bar{0}$ となり矛盾する。そこで $ht\ \mathrm{ann}(m) = i$ である。$\mathfrak{P} \ni x$ に対して $xm \in N_{i+1}$ ゆえに $ht\,\mathfrak{P} = i$，従って $\mathfrak{P} \in D_i(N)$ ∴ $\mathrm{Ass}(N_i/N_{i+1}) \subseteqq Ht_i(A)$ ∴ N_i/N_{i+1} は uniform module with $ht\,i$.

(iii) $f \in A$ を N-regular element とすれば、$f \notin \mathfrak{P}$, $\mathfrak{P} \in \mathrm{Ass}(N)$。今 $m \in N$ で $fm \in N_i$ とする。$f \notin \mathfrak{P}$, $\mathfrak{P} \in \mathrm{Ass}(N)$ ゆえに $\mathrm{ann}(fm) = \mathrm{ann}(m)$. $fm \in N_i$ ゆえに $\mathrm{ann}(fm) = \mathrm{ann}(m)$ の prime divisor はすべて $ht \geqq i$ ゆえに $m \in N_i$。

A を integral domain かつ A の integral closure $\bar{A}$ は有限 A-module で $ht\ P \cap A = 1$, for $P \in Ht_1(\bar{A})$ を満たすものとする。M を torsion free finite A-module とすれば，ある $\bar{A}$-free module F で $M \subseteqq F \subseteqq M \otimes_A Q(A)$ となるものが存在する。$\varphi : F \longrightarrow N = F/M$ として $\varphi^{-1}(N_i) = M_i$ とおけば

$$M_2 \geqq M_3 \geqq \cdots \geqq M_d \supsetneqq M_{d+1} = M$$

なる F の sub-modules の減少列が与えられる。

命題：(i) このchainはFのとり方に依らない。

(ii) $\mathrm{Ass}(M_2/M) = \Delta(M)$

(iii) $\mathfrak{p} \in D_i(M_2/M)$で$\mathfrak{q}$を$\mathfrak{p}$に属するprimary idealとすれば，$\mathrm{Ext}_{A_\mathfrak{p}}^i(A_\mathfrak{p}/\mathfrak{q}A_\mathfrak{p}, M_\mathfrak{p}) = \mathrm{Hom}_{A_\mathfrak{p}}(A_\mathfrak{p}/\mathfrak{q}A_\mathfrak{p}, M_i/M_{i+1}) = \{\bar{m} \in M_i/M_{i+1} \mid \mathrm{Ann}(\bar{m}) \supseteqq \mathfrak{q}\} \otimes_A A_\mathfrak{p}$

系：$\Delta(M)$は有限集合である。

証明 (i) F_1, F_2を条件を満たす$\bar{A}$-free moduleとすれば，F_1, F_2を含むものが存在するから，我々は$M \subset L \subset F$，L, Fはfree $\bar{A}$-module，でF/Mから得られるものをM_2，L/Mから得られるものをN_2とすれば$M_2 = N_2$であることを示せばよい。$L/M \subseteqq F/M$で$\mathrm{ht}\,\mathrm{Ann}(N_2/M) > 1$ゆえ$N_2 \subseteqq M_2$は明らか。逆を示す。そのためには、$M_2 \subseteqq L$を示せばよい。今$M_2 \not\subseteq L$とする。$N = M_2 + L$とおく。このとき$L \subsetneqq N \subseteqq F$であるから$\mathrm{Ann}(N/L) \supseteqq \mathrm{Ann}(M_2/M)$. 従って$\mathrm{ht}\,\mathrm{Ann}(M_2/M) > 1$だから$\mathrm{ht}\,\mathrm{Ann}(N/L) > 1$. $\mathfrak{p}$を$\mathrm{Ann}(N/L)$のminimal prime divisorとする。このとき$\mathfrak{p} \in \mathrm{Ass}(N/L)$だから$\mathrm{Hom}_{A_\mathfrak{p}}(A_\mathfrak{p}/\mathfrak{p}A_\mathfrak{p}, (N/L)_\mathfrak{p}) \neq (0)$. $\mathrm{ht}\,\mathfrak{p} > 1$故depth $\bar{A}_\mathfrak{p} > 1$，従ってdepth $L_\mathfrak{p} > 1$から我々は，$0 \longrightarrow L \longrightarrow N \longrightarrow N/L \longrightarrow 0$ (exact)から

$$\underset{(0)}{\underset{\parallel}{\mathrm{Ext}_{A_\mathfrak{p}}^0(A_\mathfrak{p}/\mathfrak{p}A_\mathfrak{p}, L)}} \to \underset{(0)}{\underset{\nparallel}{\mathrm{Ext}_{A_\mathfrak{p}}^0(A_\mathfrak{p}/\mathfrak{p}A_\mathfrak{p}, N_\mathfrak{p}/L_\mathfrak{p})}} \to \underset{(0)}{\underset{\parallel}{\mathrm{Ext}_{A_\mathfrak{p}}^1(A_\mathfrak{p}/\mathfrak{p}A_\mathfrak{p}, L)}}$$

これは矛盾。だから $\mathrm{Ann}(N/L)=A$, よって $M_2 \subseteq L$ を得る。

補題：$ht\, P \cap A = 1$, $P \in Ht_1(\bar{A})$ の仮定のもとでは $ht\, \mathfrak{p} > 1$ であれば $\operatorname{depth} \bar{A}_{\mathfrak{p}} > 1$。

証明 (i) $\phi: A \longrightarrow B$ を noetherian rings の homomorphism, M を B-module とすれば $\mathrm{Ass}(M) = {}^a\phi(\mathrm{Ass}_B(M))$. 今 $\operatorname{depth} \bar{A}_{\mathfrak{p}} = 1$ とすれば $0 \neq a \in \mathfrak{p}$ で, $\mathfrak{p} \in \mathrm{Ass}_A(\bar{A}/a\bar{A})$。一方 $\mathrm{Ass}_{\bar{A}}(\bar{A}/a\bar{A}) = \{P \in Ht_1(\bar{A}), P \ni a\}$, 従って $\mathrm{Ass}_A(\bar{A}/a\bar{A}) = {}^a\phi(\mathrm{Ass}_{\bar{A}}(\bar{A}/a\bar{A}))$ 故 $P \in Ht_1(\bar{A})$ で $\mathfrak{p} = P \cap A$ である。仮定から $ht\, \mathfrak{p} = 1$。

(ii) $\mathfrak{p} \in \mathrm{Ass}(M_2/M)$ とすれば M_2 の定義から $ht\, \mathfrak{p} > 1$, 従って $ht\, F_{\mathfrak{p}} > 1$, 又 $\mathfrak{p} \in \mathrm{Ass}(F/M)$ 故 $\mathrm{Hom}_{A_{\mathfrak{p}}}(A_{\mathfrak{p}}/\mathfrak{p}A_{\mathfrak{p}}, F_{\mathfrak{p}}/M_{\mathfrak{p}}) \neq (0)$。よって, $0 \longrightarrow M_{\mathfrak{p}} \longrightarrow F_{\mathfrak{p}} \longrightarrow F_{\mathfrak{p}}/N_{\mathfrak{p}} \longrightarrow 0$ (exact) から我々は $\mathrm{Ext}^0_{A_{\mathfrak{p}}}(A_{\mathfrak{p}}/\mathfrak{p}A_{\mathfrak{p}}, F_{\mathfrak{p}}/M_{\mathfrak{p}}) \cong \mathrm{Ext}^1_{A_{\mathfrak{p}}}(A_{\mathfrak{p}}/\mathfrak{p}A_{\mathfrak{p}}, M_{\mathfrak{p}}) \neq 0$ を得る。従って $\operatorname{depth} M_{\mathfrak{p}} = 1$ だから $\mathfrak{p} \in \Delta(M)$. 逆に $\mathfrak{p} \in \Delta(M)$ とすれば $ht\, \mathfrak{p} > 1$ で今示したことから, $\mathrm{Hom}_{A_{\mathfrak{p}}}(A_{\mathfrak{p}}/\mathfrak{p}A_{\mathfrak{p}}, F_{\mathfrak{p}}/M_{\mathfrak{p}}) \neq (0)$ 従って $\mathfrak{p} \in \mathrm{Ass}(M_2/M)$。特に我々は $ht\, P \cap A = 1$, $P \in Ht_1(\bar{A})$, の仮定がなくとも次の結果を得る。

命題：$\{\mathfrak{p} \in \operatorname{Spec} A : \operatorname{depth} A_{\mathfrak{p}} = 1\} = Ht_1(A) \cup \mathrm{Ass}(\bar{A}/A)$.

(1) seminormality は depth one の イデアルで判定される。seminormalization 及び seminormal については先の数理解析研講究録「可換環の研究」(No. 374)に詳しく述べたので、ここではその結果のみを記する。

定理：A を S_1－条件を満たすネーター環，R を A と $Q(A)$ の中間環で有限 A－module なるものとする。$\phi : A \longrightarrow R/A = N$ に対して $\phi^{-1}(N_i) = A_i(R)$ とおくと，$A_i(R)$ は R の部分環である。このとき A が R の中で seminormal である必要充分条件は conductor $\mathfrak{c}(A_i(R)/A)$ が $A_i(R)$ の radical ideal である。

A が R の中で seminormal であれば，A は R の gluings で与えられるが，それは $\mathrm{Ass}(R/A)$ によって次の様にして与えられる。

定理：A は R の中で seminormal で，$\mathrm{Ass}(R/A) = \{\mathfrak{p}_1 \cdots \mathfrak{p}_n\}$ とする。$\mathfrak{p}_i$ 上の R の prime ideals を $P_{i1} \cdots, P_{ie_i}$, $e_i \geq 1$, と1元 $f \in R$ の P_{ij} による residue class を $f(P_{ij})$ と書けば、

$$A = \{f \in R : f(P_{i1}) = \cdots = f(P_{ie_i}) \in \underset{i=1,\cdots,n}{k(\mathfrak{p}_i)}\}, \text{ ここで}$$

$k(\mathfrak{p}_i) = Q(A/\mathfrak{p}_i)$ である。

環の glueing の例を述べてみよう。

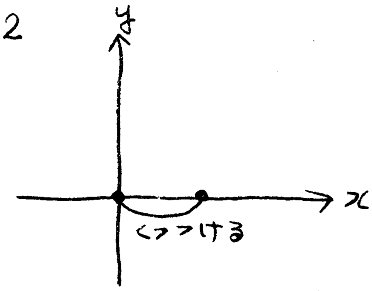
例1. 2つの平面上の2点をくっつけて1点にする。

$R = k[x,y]e_1 + k[x,y]e_2,\ e_ie_j = \delta_{ij}e_i,$

$A = \{\varphi_1(x,y)e_1 + \varphi_2(x,y)e_2 \in R : \varphi_1(0,0) = \varphi_2(0,0)\}$

$= k[X,Y,Z,V]/(XZ,XV,YZ,YV)$

例2



$R = k[x,y]$

$A = \{\varphi(x,y) \in R ; \varphi(0,0) = \varphi(1,0)\}$

$= k[x(x-1), x^2(x-1), y]$

例3 1つの直線と1点をくっつける。tは変数。

$A = \{\varphi(x,y) \in k[x,y] : \varphi(t,0) = \varphi(0,1)\}$

$= k + (xy, (x-1)y)k[x,y]$。

Aはネーター的でない，従って有限生成でないが，$\bar{A} = k[x,y]$である。

(2) overring R が A 上 flat かどうかは depth one の prime ideals で判定できる。

定理：Aをネーター整域，RをAと$Q(A)$との中間環とする。このときRがA上 *flat* である必要充分条件は、$A_\mathfrak{p} \supseteq R$，または$\mathfrak{p}R=R$がすべての depth $A_\mathfrak{p}=1$をみたす$\mathfrak{p}\in \operatorname{Spec} A$に対して成り立つ事である。

証明：$F_A(R)=\{\mathfrak{p}\in \operatorname{Spec} A : A_\mathfrak{p} \not\supseteq R\}$の minimal element は depth 1 の prime ideal である事をまず示そう。$\mathfrak{p}$を$F_A(R)$の minimal element として depth $A_\mathfrak{p}>1$とすれば，$A_\mathfrak{p}=\bigcap_{\mathfrak{q}\subsetneqq\mathfrak{p}} A_\mathfrak{q}$で$\mathfrak{q}\notin F_A(R)$ゆえに$A_\mathfrak{q}\supseteq R$から$A_\mathfrak{p}\supseteqq R$となり矛盾する。

RがA上 *flat* である必要充分条件は$\mathfrak{p}\in \operatorname{Spec} A$に対して，$A_\mathfrak{p}\supseteqq R$または$\mathfrak{p}R=R$であるから$F_A(R)$の minimal element $\mathfrak{p}$は depth 1 で，仮定から$\mathfrak{p}R=R$ゆえに我々の証明は終わる、

(3) *flat* overring RがA上で有限生成であることは depth 1 によって決まる。

命題，RがA上環として有限生成ならば$F_A^*(R)=\{\mathfrak{p}\in \operatorname{Spec} A$: depth $A_\mathfrak{p}=1$, $A_\mathfrak{p}\not\supseteq R\}$は有限集合。逆に$R$が$A$上 *flat* のとき$F_A^*(R)$が有限集合であれば$R$は$A$上有限生成である。

証明：$R=A[\alpha_1,\cdots\alpha_n]$, $\alpha_i\in R$ とする。$\alpha_1,\cdots\alpha_n$ の共通分母の1つを x とすれば，$F_A^*(R)\subseteq\{\mathfrak{p}\in \mathrm{Spec}\, A : \mathfrak{p}$ は xA の prime divisor$\}$ から $F_A^*(R)$ は有限集合である。

R は A 上 flat とし，$F_A^*(R)=\{\mathfrak{p}_1,\cdots \mathfrak{p}_t\}$ とする。$\mathfrak{a}=\mathfrak{p}_1\cap\cdots\cap\mathfrak{p}_t$ とおくと，$\mathfrak{a}R=R$，従って $\alpha_1,\cdots\alpha_n\in R$, $a_1,\cdots a_n\in\mathfrak{a}$ で $\sum a_i\alpha_i=1$．$C=A[\alpha_1,\cdots,\alpha_n]\subseteq R$ とおく。

C は A 上 flat で $F_A^*(R)=F_A^*(C)$ は簡単にわかる。一方 A 上 flat ゆえに $R=\bigcap_{\mathfrak{q}\notin F_A^*(R)} A_{\mathfrak{q}}$, depth $A_{\mathfrak{q}}=1$, から $R=C$ となる。

(4) R を A の拡大整域とする。R の中で A が root closed とは，$t\in R$ で今ある整数 $n>0$ があって $t^n\in A$ であれば $t\in A$。R を A と $Q(A)$ の中間環とすれば，A が R の中で root closed である必要充分条件は、A が A の R の中での integral closure の中で root closed. そこで R は A 上 integral とすれば，A が root closed であれば A は R の中で seminormal であるが特に次の判定法を得る。

命題　R は A 上 integral で birational とする。このとき A は R の中で root closed である必要充分条件は $\mathrm{Ass}(R/A)\ni\mathfrak{p}$, ht $\mathfrak{p}=i$, に対して conductor $\mathfrak{c}(A_i(R)/A)$ は $A_i(R)$ の radical ideal で $\mathfrak{p}$ 上の $A_i(R)$ の prime ideals はただ1つ。

それをPとすれば，$k(\mathfrak{p})$は$k(P)$の中で root closed.

証明：$Ass(R/A)=\{\mathfrak{p}_{ij},\ ht\,\mathfrak{p}_{ij}=i,\ 1\leqq j\leqq e_i\}$として，$\mathfrak{p}_{ij}$上の$A_i(R)$の prime ideal を$P_{ij}$とする。$R\ni t$，$t^n\in A$として，$t\in A_i(R)$を$i$に関する induction で示す。$t\in A_{i-1}(R)$とする。$t(P_{ij})^n\in k(\mathfrak{p}_{ij})$で$k(\mathfrak{p}_{ij})$が$k(P_{ij})$の中で root closed 故 $t(P_{ij})\in k(\mathfrak{p}_{ij})$，従って$t\in A_i(R)$，よって$i=d$のとき$t\in A$を得る。

AはRの中で root closed とすればAはRの中で semi-normal ゆえに $\mathfrak{c}(A_i(R)/A)$は$A_i(R)$の radical ideal.
$\mathfrak{p}=\mathfrak{p}_{ij}$上の$A_i(R)$の prime ideals を$P_1,\cdots P_u$，$u\geqq 2$とする。

AはRの中で root closed 故Aは$A_i(R)$の中で root closed，従って$A_\mathfrak{p}$は$R_\mathfrak{p}$の中で root closed である。

このとき$A_\mathfrak{p}=\{\alpha\in R_\mathfrak{p}:\alpha(P_1)=\cdots=\alpha(P_u)\in k(\mathfrak{p})\}$であるが，$R_\mathfrak{p}\otimes_{A_\mathfrak{p}}k(\mathfrak{p})=k(P_1)\times\cdots\times k(P_u)$ゆえにある元$\alpha\in R_\mathfrak{p}$で$\alpha(P_1)=-1$，$\alpha(P_2)=\cdots=\alpha(P_u)=1$なるものがある。従って$\alpha^2\in A_\mathfrak{p}$で$\alpha\notin A_\mathfrak{p}$，これは$A_\mathfrak{p}$が root closed であることに反する。従って$\mathfrak{p}_{ij}$上の$A_i(R)$の prime ideals はただ1つ，

それを P_{ij} とすれば，$k(g_{ij})$ が $k(P_{ij})$ の中で root closed であることは今示したことで明らかとなる。