

Certain LCM-stable modules

中部大学・現代教育学部 金光三男
Mitsuo Kanemitsu
College of Contemporary Education
Chubu University

体上のベクトル空間 ($\neq \{0\}$) より広い概念である, 整域上の自由加群は, 平坦 (flat) 加群である. これより広い概念に整域上の LCM-stable 加群がある.

この講究録では, ネーター的整域上の LCM-stableness および LCM-stable module of level n の基本性質について考察しよう.

いくつかの記号に関する準備をする.

まず R は Noetherian integral domain でその商体を K とする. L を K の有限次代数拡大とし, その 0 でない元を $\alpha \in L$ とする. $d = [K(\alpha) : K]$, $B = R[\alpha] \cap R[\alpha^{-1}]$ とおく.

A/R で L と R の中間環 A を表し, 環の拡大 A/R と呼ぶ.

更に $\alpha \in L$ に対して, α の多項式 $\phi_\alpha(X) = X^d + \eta_1 X^{d-1} + \cdots + \eta_d$ を α の monic である K 上最小多項式とする. $I_{B,\alpha} = \{b \in B \mid b\alpha \in B\}$ は B のイデアルをなし α の B における分母イデアルと呼ぶ. $J_{B,\alpha} = I_{B,\alpha} + \alpha I_{B,\alpha}$ とおき, $I_a = (R :_R aR)$, $I_{[\alpha]} = \bigcap_{i=1}^d (R :_R \eta_i)$ とする.

また, $\text{Dp}_1(R) = \{p \in \text{Spec}(R) \mid \text{depth } R_p = 1\}$ と略記する.

先に述べたように, M が flat R -module なら良く知られているように, M は LCM-stable R -module である (例えば, [A]). ここで, M が LCM-stable R -module の定義は次の通りである.

定義 1. M を R -module とする. $\forall a, b \in R$ に対して, $(aR \cap bR)M = aM \cap bM$ が成立するとき, M は LCM-stable R -module という.

F.Richman ([R]) は, 次の結果を証明した.

R がネーター的整域とし, A を R の overring とする. このとき, A が R 上 flat であることは, A が R 上 LCM-stable であることに同値である.

LCM-stable R -module で flat R -module でない例は ([U]) に挙げてある.

$R = k[s, t, u]$ は体 k 上の三変数の多項式環とする. このとき, $M = R[X]/(sX^2 + tX + u)$ は LCM-stable R -module だが, flat R -module ではない.

まず最初に LCM-stable に関する先行研究のまとめを試みよう.

(1) 環の拡大 A/R が LCM-stable R -module のとき, $P \cap R \in \text{Dp}_1(R)$ ([SY]).

(2) 上でも述べたが, 環の拡大 A/R が flat R -module とする. このとき, A/R は LCM-stable R -module であるが, 逆は必ずしも成立しない ([OY]).

(3) 環の拡大 A/R に対して. A が LCM-stable R -module であることは, $I_\lambda A = I_{A,\lambda}$ for $\forall \lambda \in K$ であることに同値である.

この場合, $P \cap R \in \text{Dp}_1(R)$ for $\forall P \in \text{Dp}_1(A)$ が成立する ([KSY]).

(4) 環の拡大 B/R が birational extension とする. B/R が LCM-stable R -module なら, $P \cap R \in \text{Dp}_1(R)$ for any $P \in \text{Dp}_1(B)$. 逆は必ずしも成立しない ([KSY]).

ここで, anti-integral element of degree d over R ([KSY], [OY]) の定義を復習しよう.

R の商体 K の有限次代数拡大体 L の元 α の K 上の monic 最小多項式は次数が d で $\phi_\alpha(X) = X^d + \eta_1 X^{d-1} + \cdots + \eta_d$ とする. $\pi : R[X] \rightarrow R[\alpha]$ を R -代数の準同型写像で X を α に移すとする.

このとき, α が anti-integral element of degree d over R とは, $\text{Ker}(\pi) = I_{[\alpha]}\pi_\alpha(X)R[X]$ のときをいう. α が R 上 anti-integral element のとき, $R[\alpha]$ は R の anti-integral extension という.

また下記の (7) に出てくる super-primitive element の定義 ([KSY], [OY]) も復習しておく.

$J_{[\alpha]} = I_{[\alpha]}c(\phi_{[\alpha]}(X))$ とする. ここで, $c(\phi_{[\alpha]}(X))$ は R の商体 K における $\phi_{[\alpha]}(X)$ の係数 $1, \eta_1, \dots, \eta_d$ によって生成される分数イデアルとする.

元 α が super-primitive element of degree d over R とは, $J_{[\alpha]} \not\subset p$ for all $p \in \text{Dp}_1(R)$.

(5) α を anti-integral element of degree d over R とする. R -module $B = R[\alpha] \cap R[\alpha^{-1}] \cong R \oplus I_{[\alpha]}^{d-1}$ とおく. $I_{[\alpha]}$ が R の可逆イデアルでないとすると, B/R は LCM-stable ではない ([KSY]).

(6) α が anti-integral element over R とする. $I_{B,\alpha}$ が B の可逆イデアルで A が LCM-stable R -module なら, A は flat R -module ([KSY2]).

(7) α が R 上 super-primitive element とする. もし $I_{B,\alpha}$ が B の可逆イデアルで A が LCM-stable R -module なら, A は flat R -module ([KSY2]).

次に LCM-stable R -module of level n について, [K] に掲載される予定 (accept 済み) の研究集会で口頭発表した内容について説明をしよう.

定義 2. R を Noetherian domain, A/R を環の拡大 (必ずしも overring とは限らない) とする.

このとき, A が LCM-stable R -module of level n とは, 任意の $n+2$ 個の R の元 $a_1, a_2, \dots, a_n, x, y$ に対して, $((a_1, a_2, \dots, a_n, x)R \cap (a_1, a_2, \dots, a_n, y)R)A = (a_1, a_2, \dots, a_n, x)A \cap (a_1, a_2, \dots, a_n, y)A$ が成立するときをいう.

$n=0$ の場合は, 先に述べた A が LCM-stable R -module のことである.

$m \leq n$ の場合, A が LCM-stable R -module of level n なら, A が LCM-stable R -module of level m となる.

正則列と深さの定義の復習をしよう (例えば, [M]).

A を環とし, M を A 加群とする. A の元の列 a_1, \dots, a_n が M -**正則列** (M -sequence) とは, 次の 2 条件が満たされる時である.

- (1) a_1 が M -正則, a_2 が (M/a_1M) -正則, \dots , a_n が $(M/\sum_1^{n-1} a_i M)$ -正則,
- (2) $M/\sum_1^n a_i M \neq 0$.

M -正則列の元を並べ替えると M -正則列でなくなるときもある ([M]).

また環 A のイデアル I と有限 A 加群 M で $M \neq IM$ としたとき, I 中の極大 M 正則列の長さを M の **I-depth** という. この長さは一定であり, $\text{depth}(I, M)$ で表す. それを n とすれば, $\text{depth}(I, M) = \inf\{i \mid \text{Ext}_A^i(A/I, M) \neq 0\}$ (言い換えると, $\text{Ext}_A^n(A/I, M) \neq 0$, $\text{Ext}_A^j(A/I, M) = 0$ for $i < n$). 特に局所環 (A, m) の $\text{depth}(m, M)$ を単に M の**深さ**といい, $\text{depth}_A M$ または $\text{depth } M$ と書く ([M]).

定理. A が LCM-stable R -module of level n で, a_1, a_2, \dots, a_{n+2} が R -正則列とする. このとき, a_1, a_2, \dots, a_{n+2} は A -正則列となる.

この証明の概略を述べよう. n に関する数学的帰納法で証明する. $n=0$ の場合も同様に示すことができる. $n-1$ まで正しいとする. a_1, a_2, \dots, a_{n+1} は R -正則列だから, 数学的帰納法の仮定より A -正則列である. a_1, a_2, \dots, a_{n+2} は R -正則列だから, $((a_1, a_2, \dots, a_{n+1}) :_R a_{n+2}) = (a_1, a_2, \dots, a_{n+1})R$. 一方, A/R が LCM-stable module of level n だから, $a_1, a_2, \dots, a_{n+2} \in R$ に対して, $\text{Tor}_1^R(R/(a_1, a_2, \dots, a_{n+2})R, A) = (0)$. これを使用すると $((a_1, a_2, \dots, a_{n+1}) :_A a_{n+2})A = ((a_1, a_2, \dots, a_{n+1}) :_R a_{n+2})A = (a_1, a_2, \dots, a_{n+1})A$. (即ち, $((a_1, a_2, \dots, a_{n+1})R : a_{n+2}) \otimes_R A \rightarrow ((a_1, a_2, \dots, a_{n+1}) :_A a_{n+2})$ は surjective). よって, a_1, a_2, \dots, a_{n+2} は A -正則列である.

この定理の応用を幾つか述べよう.

A が LCM-stable R -module of level n で, $P \in \text{Spec}(A)$ で $\text{depth } A_P = n+1$ とする. このとき $p = P \cap R$ に対して, $\text{depth } R_p \leq n+1$ が成立する. 更に, A が R 上

integral extension のときは, 任意の $\text{depth } R_p = n + 1$ となる R の素イデアル p に対して, $\text{depth } A_p = n + 1$ で $P \cap R = p$ となるような A の素イデアルが存在する. 特に, $\text{depth } R_p = 1$ でありことは $\text{depth } A_p = 1$ と同値である.

参考文献

- [A] T.Akiba, LCM-stableness, Q-stableness and flatness, *Kobe J. Math.*, **2** (1985), 67-70.
- [K] M.Kanemitsu, LCM-stable module of level n , to appear in *JP Journal of Algebra, Number Theory and Applications*.
- [KSY] M.Kanemitsu, J.Sato and K.Yoshida, Integrality and LCM-stableness of simple extensions over Noetherian domains, *Communications in Algebra*, vol. **24** no.10 (1996), 3229-3235
- [KSY2] M.Kanemitsu, T.Sugatani and K.Yoshida, Flatness and LCM-stability of simple extensions over Noetherian domains, *Communications in Algebra*, **27**(5), (1999), 2187-2191.
- [M] 松村英之, 可換環論, 共立出版 1980 年.
- [OY] S.Oda and K.Yoshida, Simple extensions with the minimum degree relations of integral domains, *Lecture note in pure and applied mathematics*, vol. **253**, Chapman and Hall/CRC, 2007 年.
- [R] F.Richman, Generalized quotient rings, *Proc. Math. Soc.* **16** (1965), 794-799.
- [SY] J.Sato and K.Yoshida, The LCM-stability on polynomial extensions, *Math. Rep. Toyama Univ.*, **10** (1987) 75-84.
- [U] H.Uda, Incomparability in ring extensions, *Hiroshima Math. J.*, **9** (1979), 451-463.