正標数の環における導分

七条 彰紀

2017 年 10 月 28 日

1 準備

定義 1.1 (Derivation, k-Derivation.)
A :: ring, M :: module とする．任意の $a, b \in A$ に対して次を満たす写像 $D : A \to M$ を derivation とよぶ．

(i) $D(a + b) = D(a) + D(b)$.
(ii) $D(ab) = D(a) \cdot b + a \cdot D(b)$.

(ii) は Leibniz Formula (or Rule) と呼ばれる．以下，必要に応じて $D(a)$ を Da と表記する．

準同型 $f : k \to A$ によって A を k-module とみなせる時，$D \circ f = 0$ を満たす derivation D を k-derivation と呼ぶ．

$\mathrm{Der}(A, M)$ で $A \to M$ の derivation 全体を表す．$\mathrm{Der}(A, A)$ は $\mathrm{Der}(A)$ と略す．$\mathrm{Der}_k(A, M)$ で $A \to M$ の k-derivation 全体を表す．$\mathrm{Der}_k(A, A)$ は $\mathrm{Der}_k(A)$ と略す．

$\mathrm{Der}(A, M), \mathrm{Der}_k(A, M)$ が A-module になることは明らか．$a \in A, n \geq 0$ について $Da^n = na^{n-1}Da$ が成り立つことは帰納法を用いて簡単に示せる．

次が成り立つ．

命題 1.2
A :: ring, $D \in \mathrm{Der}(A)$, $a, b \in A$, $n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ とする．

$$D^n(ab) = \sum_{i=0}^{n} \binom{n}{i} (D^i a)(D^{n-i} b).$$

ただし $D^0 = \mathrm{id}_A$ とする．

証明は n についての帰納法に拠る．

今，A :: ring が正標数 $n > 0$ [†1] を持つとしよう．n が素数ならば，$\binom{n}{i}$ は $i = 1, \ldots, n - 1$ について n の倍数であるから，次が成り立つ．

$$D^n(ab) = (D^n a) \cdot b + a \cdot (D^n b). \tag{$*$}$$

すなわち，$D^n \in \mathrm{Der}(A)$ となる．

[†1] $f : \mathbb{Z} \to A$ を唯一の写像 $1_{\mathbb{Z}} \mapsto 1_A$ とすると，$f^{-1}((0)) = \ker f \subseteq \mathbb{Z}$ は $\mathbb{Z}$ のイデアルであり，したがって $\ker f = (n)$ となる $n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ が存在する．この n を A の標数と呼ぶ．A が整域，すなわち $(0) \subseteq A$ が素イデアルならば，$\ker f$ も素イデアルになり（可換環論の基本的命題），したがって標数 n は素数になる．

2 $(*)$ の反例

一方，n が素数でない，すなわち合成数でない時には $(*)$ が成り立たないことがある．

例 2.1
$A = (\mathbb{Z}/4\mathbb{Z})[x], D = x\frac{d}{dx}$ とする．この場合，A の標数は 4．ただし $\frac{d}{dx}$ は x についての通常の微分であり，明示すれば $\frac{d}{dx}x = 1, \frac{d}{dx}1 = 0$ を満たす．$\frac{d}{dx} \in \mathrm{Der}(A)$ と $\mathrm{Der}(A)$ :: A-module より $D \in \mathrm{Der}(A)$．$Dx = x \cdot 1 = x$ だから，$D^4(x^2)$ は次のように成る．

$$D^4(x^2) = D^3(D(x^2)) = D^3(2x^{2-1}(Dx)) = D^3(2x^2) = \cdots = 2^4x^2 = 0.$$

一方，$D^4(x^2) = D^4(x \cdot x)$ と考えて $(*)$ の右辺を計算すると，次のよう．

$$(D^4x) \cdot x + x \cdot (D^4x) = 2x^2 \neq 0.$$

なので $(*)$ は成立しない．

例 2.2
n に加えて文字 a, b を加えて更に一般化する．$A = (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})[x], D = x\frac{d}{dx}$ とする．ある $a, b > 0$ について $(a+b)^n \neq a^n + b^n$ であるとしよう．この時，$(*)$ の反例がある:

$$D^n(x^a \cdot x^b) = (a+b)^n x^{a+b} \neq (a^n + b^n)x^{a+b} = D^n(x^a) \cdot x^b + x^a \cdot D^n(x^b).$$

一方，次の命題が成立する．

命題 2.3
n を正整数とする．次は同値[†2]．

(1) ${}^\forall a, b \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z},\ \ (a+b)^n = a^n + b^n$.
(2) ${}^\forall x \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z},\ \ x^n = x$.
(3) n は素数または Carmichael 数.

(証明). (1) $\Longrightarrow$ (2) の証明は $x = 1 + 1 + \cdots + 1$ とすれば出来るし，(2) $\Longrightarrow$ (1) の証明は $x = a + b$ とすれば出来る．(2) $\Longleftrightarrow$ (3) は Fermat の小定理と Carmichael 数の定義である． ∎

したがって，以上の方法では n が Carmichael 数 $(561, 1105, 1729, 2465, 2821, \ldots)$ であるときの $(*)$ の反例が作れない．しかし，環 A を多変数にすれば容易に $(*)$ の反例が作れる．というよりも，一般の設定を具体的な環で再現できる．

例 2.4
n を正整数とする．

$$A = (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})[x_0, \ldots, x_n], \qquad D = \sum_{i=0}^{n} x_{i+1}\frac{\partial}{\partial x_i}.$$

†2 Pratibha Ghatage and Brian Scott(2005), *Exactly When Is* $(a+b)^n \equiv a^n + b^n \pmod{n}$ *?*, `http://www.jstor.org/stable/30044877`.

ただし，$x_{n+1} = 1$ とする．このようにすると，$i = 0, \ldots, n$ について $D^i x_0 = x_i$ となる．したがって $D^n(x_0 \cdot x_0)$ は次のようになる．

$$D^n(x_0 \cdot x_0) = x_0 x_n + \sum_{i=1}^{n-1} \binom{n}{i} x_i x_{n-i} + x_n x_0.$$

当然，$\{x_i x_{n-i}\}_{i=1}^{n-1}$ は $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ 上線形独立である．したがって $\sum$ の部分が 0 になるのは，$i = 1, \ldots, n-1$ について $\binom{n}{i} \bmod n = 0$ となる時のみである．このことは，次の主張の通り，n が素数であることと同値である．

命題 2.5

正整数 n を考える．$i = 1, \ldots, n-1$ について次式が成り立つことと，n が素数であることは同値である．

$$\binom{n}{i} \bmod n = \frac{n!}{i!(n-i)!} \bmod n = 0.$$

(証明).

■($\Longrightarrow$)． n を合成数とし，p をその素因数[†3] とする．また $m = n/p$ とする．

$$\binom{n}{p} = \frac{n(n-1)\cdots(n-p+1)}{p!} = m \cdot \frac{(n-1)\cdots(n-p+1)}{(p-1)!}.$$

これが n の倍数であると仮定しよう．$n = m \cdot p$ なので，仮定により，$\frac{(n-1)\cdots(n-p+1)}{(p-1)!}$ は p の倍数である．特に $(n-1)\cdots(n-p+1)$ が p の倍数．しかし $p-1$ 個の整数 $n-1, \ldots, n-(p-1)$ はいずれも p と互いに素である[†4] から，これはありえない．

■($\Longleftarrow$)． n が素数であるとする．すると $1 \le i \le n-1$ より，$i!$ は n の倍数ではない．$1 \le i \le n-1$ ならば $1 \le n-i \le n-1$ だから，$(n-i)!$ も同様．したがって $i!(n-i)!$ は n の倍数ではなく，$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ は n の倍数． ■

3 (∗) の成立

標数 n が合成数であっても $(*)$ が成り立つのはどんな場合か，という問に対しては次がひとつの答えを与える．

命題 3.1

A, k :: ring, $D \in \mathrm{Der}_k(A)$ とする．A の標数 n は合成数であるとする．A は次を満たすとする．

(1) A の任意の元が $G \subseteq A$ の元の積の k 線型結合として書ける．
(2) G の任意の元 g について $D^2 g = 0$.

この時，$D^n = 0$．したがって任意の $a, b \in A$ について $(*)$ の等号が成り立つ．

この命題の仮定のうち，条件 (2) 以外は次のような環で成り立つ: k 上の多項式環・形式的ベキ級数環，及びその剰余環，k の元による局所化，テンソル積，直積．

[†3] `https://www.anothermathblog.com/?p=72` では p を特に最小のものとしているが，以下の通り，この仮定は不要である
[†4] $1, \ldots, p-1 \bmod n \neq 0$ と $n \bmod n = 0$ から $n-1, \ldots, n-(p-1) \mathrm{mod} \neq 0$ が得られる．