数理解析研究所講究録
第 608 巻 1987 年 47-69

Artin-Schreier-Witt 理論の変形
—— u-calculus の視点から ——

筑波大数学系　竹内光弘
(Mitsuhiro Takeuchi)

	群	Lie 環
algebra A の	units U(A)	A , xy − yx
	Aut(A)	Der(A)
代数群 G の	rational points	Lie algebra
ホップ代数 H の	group-like elements	primitive elements

この表の左右の対応する概念はそれぞれ乗法と加法から，ある共通の手続きで統一的に得られる．乗法と加法の中間的概念として，基礎環の元 u に対する u-乗法を導入し，その手続きを u-乗法に対し適用して得られる概念とその若干の応用を論ずる．

可換環 R 上で考える．

加法と乗法を <u>formal semigroup</u> として捉える．

文字 X, Y の words ($XY, YXY, XYYX, \emptyset$ など)のすべての R-線形結合の全体 $R\langle X, Y\rangle$ は R-algebra の構造をもつ. その元としての

$$\text{加法 } F_a(X,Y) = X + Y, \text{ 乗法 } F_m(X,Y) = XY$$

は次の意味で formal semigroup である.

<u>Def</u> $F(X,Y) \in R\langle X,Y\rangle$ が formal semigroup であるとは

(i) $F(F(X,Y),Z) = F(X,F(Y,Z))$ in $R\langle X,Y,Z\rangle$,

(ii) $\exists\, e_F \in R$ with $F(X,e_F) = X = F(e_F,X)$.

<u>Thm</u> R が reduced ならば, $e_F = 0$ なる formal semigroup は次のものに限る:

$$F_{a,b}(X,Y) = X + Y + aXY + bYX,$$

ここで $a, b \in R$ with $ab = 0$.

<u>Cor</u> R が整域ならば, $e_F = 0$ なる formal semigroup は

$$F_u(X,Y) = X + Y + uXY \quad (u \in R)$$

及びその opposite に限る.

以下では，このタイプの formal semigroup を考察の対象とする．
F_u は加法 F_a と乗法 F_m の間の deformation と考えられる．
$u=0$ のとき $F_0=F_a$，$u=1$ のとき $X \mapsto 1+X$ により
$F_1 \cong F_m$ である．$\varphi_u(X)=1+uX$ は formal semigroup map

$$\varphi_u : F_u \longrightarrow F_m$$

を与える．即ち，$\varphi_u(F_u(X,Y))=F_m(\varphi_u(X),\varphi_u(Y))$，$\varphi_u(0)=1$ が成立つ．

F_u はすべての R-algebra の上に，0 を単位元とする半群の構造を定義する．A を任意の R-algebra とする．

<u>Lem</u>　$a\in A$ が F_u-product に関して unit（このとき a を <u>u-unit</u> とよぶ）$\Longleftrightarrow$ $\varphi_u(a)=1+ua$ が unit．この時 a の F_u-inverse は $a^*=-a\varphi_u(a)^{-1}$ である．

A の u-units の群を $G_u(A)$ とする．R-algebra に群を対応させる関手 G_u は加法群 G_a と乗法群 G_m の間の deformation を与えている：$G_0=G_a$，$G_1\cong G_m$．

G_u は faithfully flat R-algebra

$$H_u = R[X, \varphi_u(X)^{-1}]$$

で represent されている．即ち，$G_u(A) \cong Alg_R(H_u, A)$.

<u>u-derivation と u-automorphism</u>

R-linear map $f : A \longrightarrow A$ が
algebra map とは，$f(ab) = f(a)f(b)$ ，$f(1) = 1$ ，
derivation とは，$f(ab) = af(b) + f(a)b$ ，$f(1) = 0$
のことである $(a, b \in A)$.

F_u に対応して次の中間的な概念が得られる．

<u>Def</u> $u \in R$ に対し，R-linear map $f : A \to A$ が
u-derivation とは

$$f(ab) = af(b) + f(a)b + uf(a)f(b), \quad f(1) = 0$$
$$(a, b \in A)$$

が成立つことと定める．

通常の derivation とは 0-derivation の事であり，f が 1-derivation とは $1 + f$ が A の algebra endomorphism という事である．A の u-derivation の全体を $Der_u(A)$ とする．

<u>Prop</u> $Der_u(A) \subset End_R(A)$ は F_u-product で閉じている．

A の u-derivation f が $End_R(A)$ で u-unit である事は $\varphi_u(f) = 1 + uf$ が algebra A の automorphism である事と同値である。このとき f を A の <u>u-automorphism</u> とよぶ。f の F_u-inverse もまた u-derivation になる。従って A の u-automorphism の全体を $Aut_u(A)$ とおけば，

<u>Prop</u> $Aut_u(A)$ は $G_u(End_R(A))$ の部分群をなす。

$Aut_0(A) = Der_0(A) = Der(A)$ であり，$f \longleftrightarrow 1+f$ は群の同形 $Aut_1(A) \cong Aut(A)$ を与える。

<u>u-primitive elements</u>

H を R 上のホップ代数とする。その coalgebra structure を $\Delta : H \longrightarrow H \otimes H$ 及び $\varepsilon : H \longrightarrow R$ であらわし，antipode を $S : H \longrightarrow H$ であらわそう。H の元 x が primitive であるとは，$\Delta(x) = x \otimes 1 + 1 \otimes x$，$\varepsilon(x) = 0$ が成立つ事である。このとき $S(x) = -x$ であり，H の primitive elements の全体 $P(H)$ は $[x, y] = xy - yx$ に関して H の Lie subalgebra をなし，更に R が標数 p なら $x \longmapsto x^p$ でも閉じている。一方 H の元 x が group-like であるとは，$\Delta(x) = x \otimes x$，$\varepsilon(x) = 1$ が成立つ事である。このとき $S(x) = x^{-1}$ であり，H の

group-like elements の全体 $G(H)$ は H の units $U(H)$ の subgroup をなす. formal semigroups F_a, F_m を用いて

$x \in H$ が

primitive $\Longleftrightarrow$ $\Delta(x) = F_a(x \otimes 1, 1 \otimes x)$, $\varepsilon(x) = 0$,

group-like $\Longleftrightarrow$ $\Delta(x) = F_m(x \otimes 1, 1 \otimes x)$, $\varepsilon(x) = 1$

と rephrase できるから, 今考えている F_u $(u \in R)$ に関して次の定義を導入するのは自然である.

<u>Def</u> H の元 x が <u>u-primitive</u> とは

$$\Delta(x) = F_u(x \otimes 1, 1 \otimes x), \quad \varepsilon(x) = 0$$

が成立つ事と定める. H の u-primitive elements の全体を $P_u(H)$ とおく.

$P_0(H) = P(H)$, $P_1(H) = \{ g - 1 \mid g \in G(H) \}$ である. x が u-primitive なら $\varphi_u(x)$ は group-like ゆえ可逆. 従って u-primitive elements は u-units である.

<u>Prop</u> ホップ代数 H に対し, $P_u(H)$ は $G_u(H)$ の subgroup をなす.

群関手 G_u を represent する R-algebra $H_u = R[X, \varphi_u(X)^{-1}]$ は，X を u-primitive とする Hopf 代数の構造をもつ．実際 $\Delta : H_u \longrightarrow H_u \otimes H_u$ は $\Delta(X) = F_u(X \otimes 1, 1 \otimes X)$ なる unique algebra map であり，ε, S も同様に定義される．このホップ代数 H_u は G_u を可換な R-algebra の圏に制限して得られる群関手を represent している．即ち

$$G_u|_{com.alg.} = Sp_R\, H_u \quad (H_u \text{ のアフィン } R\text{-群スキーム}).$$

とくに $H_0 = R[X]$, X primitive ; $H_1 = R[X, (1+X)^{-1}]$, $1+X$ group-like．H_1 は群環 $R[\mathbb{Z}]$ と同形である．

$\underline{\{G_u(A)\}_{u \in R}}$ の構造

R-algebra A とホップ代数 H に対する $Der(A)$ 及び $P(H)$ は $[x, y] = xy - yx$（さらに R が標数 p なら x^p）で閉じている．個々の $u \in R$ でなく，u が R の元を走る family $\{G_u(A)\}$, $\{P_u(H)\}$ を考えると類似の構造をもつことが分る．

Prop　R-algebra A に対し，群の族 $\{G_u(A)\}_{u \in R}$ は次の operations をもっている：

(i) スカラー乗法. $u, v \in R$ に対し

$$G_{uv}(A) \longrightarrow G_u(A),\ a \longmapsto va$$

は group hom. である.

(ii) u, v-bracket. $u, v \in R$ に対し
$a \in G_u(A)$, $b \in G_v(A)$ ならば $[a, b]_{u,v} \overset{def}{=} (ab - ba)\varphi_u(a)^{-1}\varphi_v$
は A の uv-unit である. その F_{uv}-inverse は $[b, a]_{v,u}$
である. $\varphi_{uv}\left([a, b]_{u,v}\right) = \varphi_u(a)\varphi_v(b)\varphi_u(a)^{-1}\varphi_v(b)^{-1}$ が
成立つ.

(iii) R が標数 p (素数) ならば, $a \in G_u(A)$ に対し $a^p \in G_{u^p}(A)$ である.

とくに $G_0(A)$ は (i) ~ (iii) の構造で閉じている. それが A の (p-) Lie 構造というわけである.

<u>例 (u, v-bracket の)</u>

$[a, b]_{0,0} = ab - ba$.

$[\ ,\ ]_{1,1}$ は群 $G_1(A)$ の commutator.

$[\ ,\ ]_{1,0}$ は inner action と関係する. 即ち,
$a \in G_u(A)$ に対し

$id_A + [a, -]_{1,0} = inn(1+a)$ ($1+a$ の inner 作用),

とくに $[a, -]_{1,0}$ は 1-automorphism である.

(i) ～ (iii) の構造をもつ群の族 $\{G_u(A)\}_{u\in R}$ は，勿論その構造の間に何らかの関係を満たしているであろう．今その関係をすべて明らかにすることはできないが，とりあえず，この族 $\{G_u(A)\}$ を <u>Lie family of groups</u>（標数 p のときは <u>p-Lie family</u> ‥‥）とよぶことにしよう．

<u>Prop</u> (a) R-algebra A に対し，$\{\mathrm{Aut}_u(A)\}_{u\in R}$ は (p-) Lie family $\{G_u(\mathrm{End}_R(A))\}_{u\in R}$ の subfamily である．即ち (i) ～ (iii) の operations に関して閉じている．

(b) R 上のホップ代数 H に対し，$\{P_u(H)\}_{u\in R}$ は (p-) Lie family $\{G_u(H)\}_{u\in R}$ の subfamily である．

(i) ～ (iii) の operations と可換な group hom. の family として (p-Lie) family of groups の hom. が定義される．その例は次に述べる inner u-automorphism である．

<u>Prop</u> R-algebra A に対し

(a) $a\in G_u(A)$ ならば $\mathrm{inn}_u(a) \overset{def}{=} [a,-]_{u,0}$ は A の u-automorphism である．(<u>inner u-automorphism</u> とよぶ)．$\varphi_u(\mathrm{inn}_u(a))$ は $\varphi_u(a)$ による通常の inner action である．

(b) $\mathrm{inn}_u : G_u(A) \longrightarrow \mathrm{Aut}_u(A)$ は group hom.

(c) $\mathrm{Im}(\mathrm{inn}_u)$ は $\mathrm{Aut}_u(A)$ の normal subgroup*. (その商群 $\overline{\mathrm{Aut}_u}(A)$ を outer u-aut. の群とよぶ).

(d) $\{\mathrm{inn}_u\}_{u\in R} : \{G_u(A)\}_{u\in R} \longrightarrow \{\mathrm{Aut}_u(A)\}_{u\in R}$ は (p-) Lie family の hom. である.

(e) $\{\mathrm{Aut}_u(A)\}_{u\in R}$ の (p-) Lie structure は $\{\overline{\mathrm{Aut}_u}(A)\}_{u\in R}$ 上の (p-) Lie structure を引起す. 即ち $\{\overline{\mathrm{Aut}_u}(A)\}$ は $\{\mathrm{Aut}_u(A)\}$ の quotient (p-) Lie family である.

所で, R-algebra H_u は群関手 G_u を represent しているのだから, $\{G_u\}_{u\in R}$ 上の (p-) Lie structure に対応する構造を $\{H_u\}_{u\in R}$ はもつ筈である. とくに R-algebra A が可換 (で R が標数 p) ならば (iii) の operation $a \longmapsto a^p$, $G_u(A) \longrightarrow G_{u^p}(A)$ はアーベル群の hom. である. 対応するホップ代数の map

$$H_{u^p} \longrightarrow H_u$$

は, H_{u^p} の canonic な生成元を, H_u の canonic な生成元の p 乗に対応させる写像である. これを u-Frobenius map とよぶ.

---

* $F_u(f, \mathrm{inn}_u a, f^*) = \mathrm{inn}_u\, \varphi_u(f)(a)$, $a \in G_u(A)$, $f \in \mathrm{Aut}_u(A)$.

Crossed products

群Γが環Sに(左から)環の自己同形として作用しているとき,Γをbaseとする左S-自由加群$S*\Gamma$に

$$(a*\gamma)(b*\delta) = a\cdot\gamma(b)*\gamma\delta$$

$(a, b\in S,\ \gamma,\delta\in\Gamma)$なる環の構造が入る. これを$S$と$\Gamma$のcrossed productとよぶ. 同様に, R上の(p-)Lie環Lから, R-algebra Aに対する$\mathrm{Der}(A)$への(p-)Lie mapが与えられていれば, $A\otimes U(L)$, ここで$U(L)$はLの$\underbrace{\text{enveloping}}_{\text{universal}}$ algebra, はR-algebraの構造をもつ. これらのcrossed productsにおいて, 元(もと)の作用はinner化されている. 即ち$S*\Gamma$においては

$$(1*\gamma)(a*1)(1*\gamma^{-1}) = \gamma(a)*1$$

が, $A\otimes U(L)$においては

$$[1\otimes x, a\otimes 1] = x(a)\otimes 1 \quad (x\in L,\ a\in A)$$

がそれぞれ成立つ. 群やLie環のalgebraへの作用はホップ代数の作用として統一的に説明され, 上に述べたcrossed productsはalgebraとそれに左から作用するホップ代数とのsmash productsの特別な場合である.

R-algebra Aのu-automorphism fを与えると, このfに関係して$A\otimes H_u$は

$$Xa = aX + f(a) + uf(a)X \quad , \ a \in A$$

を満たすR-algebraの構造(但しXはH_uのcanonicな生成元)をただ一つもつ．もちろんここでAとH_uはそのsub-algebraとみている．これを$A \underset{f}{*} H_u$とかき，AとH_uのfに関するcrossed productとよぶ．ホップ代数の用語でいえばXの作用がfであるような，ホップ代数H_uのAへの左からの作用がただ一つ存在し，この作用に関するsmash product $A \# H_u$が$A \underset{f}{*} H_u$である．上の式は

$$f = \mathrm{inn}_u X|_A$$

と読める．つまりAのu-aut. fは$A \underset{f}{*} H_u$におけるinner u-aut. $\mathrm{inn}_u X$のAへの制限である． $u=0$のとき，つまり$f \in \mathrm{Der}(A)$のとき，$A \underset{f}{*} H_0 = A[X; f]$はいわゆる，$f$に関するOre extensionであり，$u=1$のときは，$A$の自己同形$1+f$に関する$\mathbb{Z}$の$A$への作用についての$A \underset{1+f}{*} \mathbb{Z}$が$A \underset{f}{*} H_1$である．

アーベル拡大の群

有限群Γに対し，可換環RのΓ-ガロア拡大とは，可換忠実有限生成射影的R-algebra Sと，R-algebraの同形

$$S * \Gamma \ (\text{crossed product}) \cong \mathrm{End}_R(S)$$

を引起す group hom. $\alpha : \Gamma \longrightarrow \mathrm{Aut}_R(S)$ からなる pair (S, α) のことと定めよう．（R, S の可換性を仮定しないこともできる）．その同形類の全体を $Gal(R, \Gamma)$ と記すことにする．R が体 k のときは，Π を k の分離閉包 k_s の k 上の位相ガロア群とするとき，Π を Γ に自明に作用させれば

$$Gal(k, \Gamma) \cong H^1(\Pi, \Gamma) \left(= \mathrm{Hom}_c(\Pi, \Gamma)/\Gamma\text{-inn}\right)$$

なる同一視が成立つ．つまり Π から discrete 群 Γ への連続準同形全体を，Γ の元による共役で類別した集合と，k の Γ-ガロア拡大の同形類の集合の間に，自然な 1:1 対応がある．一般の可換環 R に対しては，Π に相当する群がちょっと考えられないので，その代りに $Gal(R, \Gamma)$ を用いると考えてよい．

とくに Γ を可換とすると $Gal(R, \Gamma)$ は群の構造をもつ．R の２つの Γ-ガロア拡大 (S_i, α_i), $i=1,2$, に対し

$$S = \{x \in S_1 \otimes S_2 \mid I_1 \otimes \alpha_2 = \alpha_1 \otimes I_2 \ \text{ on } x\}$$

とおき，その上で $\alpha = I_1 \otimes \alpha_2 = \alpha_1 \otimes I_2$ とおけば，(S, α) は R の Γ-ガロア拡大になる．(S, α) の類を (S_i, α_i) の類の積と定める事により $Gal(R, \Gamma)$ はアーベル群をなす．

単位元は，$|\Gamma|$ 個の R の直積 $Map(\Gamma, R)$ に，$(\gamma f)(\gamma') = f(\gamma'\gamma)$，$f \in Map(\Gamma, R)$，$\gamma, \gamma' \in \Gamma$ で Γ を作用させてえられる拡大の類であり，逆元は $\gamma \mapsto \gamma^{-1}$ を通して作用させたものの類である．R を体 k とすれば，有限 p-ベル群 Γ に対し

$$Gal(k, \Gamma) \cong H^1(\Pi, \Gamma) = Hom_c(\Pi, \Gamma)$$

はアーベル群の同形となる．

有限群 Γ の代りに *flat affine group* $G = Sp_R H$（H は R 上 *flat* な可換ホップ代数）を用いて，R の G-ガロア拡大 (S, α) を定義する事ができる．ここで S は忠実平坦可換 R-*algebra*，$\alpha : G \longrightarrow Aut_R(S)$ は R-群関手の *hom.*，但し $Aut_R(S)$ は任意の可換 R-*algebra* T に $Aut_T(T \otimes S)$ を対応させる群関手をあらわすものとする．さらに，前の $S * \Gamma \cong End_R(S)$ に相当する

$$\beta : S \otimes S \cong S \otimes H$$

を満たすと仮定する．β は，G の S への作用 α を R-*algebra map* $\rho : S \longrightarrow S \otimes H$（これを構造として，$S$ は右 H *comodule algebra* である）と同一視し，ρ を左 S-*linear* に拡張したものである．

RのG-ガロア拡大(S, α)の同形類の全体を$Gal(R, G)$と記すことにしよう. 前に述べた$Gal(R, \Gamma)$は, constant R-group Γ_Rに対する$Gal(R, \Gamma_R)$に他ならない. 体kに対しては, 位相群Πがdiscrete群$G(k_s)$に連続に作用するが, k perfect or G algebraic smooth 等の条件の下で$Gal(k, G)$はガロア・コホモロジー$H^1(\Pi, G(k_s))$と同一視される[1, III, §5, 3.5, 3.6]. またGが可換(つまりHがcocommutative)ならば$Gal(R, G)$は群構造をもつ.

さて加法群G_aと乗法群G_mに対しては

$$Gal(R, G_a) = 0, \quad Gal(R, G_m) = Pic(R)$$

が知られている[1, III, §4, 6.6, 4.4]. $u \in R$に対するG_uについては次の表示を得る:

<u>Thm</u> $Gal(R, G_u) \cong Pic_u(R)$.

ここでu-Picard群$Pic_u(R)$は$M \in Pic(R)$とR/uR-加群の同形$\theta : R/uR \cong M/uM$の対(M, θ)の同形類の全体が積$(M_1, \theta_1)\cdot(M_2, \theta_2) = (M_1 \otimes M_2, \theta_1 \otimes \theta_2)$に関してなすアーベル群をあらわす. 明らかに$Pic_0(R) = 0$, $Pic_1(R) = Pic(R)$である.

$G = Sp_R H$ に対し R の G-ガロア拡大 (S, α) を, α を右 H comodule algebra の構造 $\rho : S \longrightarrow S \otimes H$ と同一視して, (S, ρ) のことばで表現できる事を前に述べた. その観点によれば, 可換性の仮定は全く不要になるから, 一般の R 上のホップ代数 H と R-algebra A に対し, A の H-ガロア拡大 (B, ρ) を考える事ができる. $\rho : B \rightarrow B \otimes H$ は右 H comodule 構造である algebra map,

$$A = \{ b \in B \mid \rho(b) = b \otimes 1 \}$$

とし, ρ の引起す左 B-linear map は同形と仮定する:

$$\beta : B \underset{A}{\otimes} B \xrightarrow{\cong} B \otimes H$$

(さらに, B_A 又は ${}_AB$ の忠実平坦を仮定した方がより理論が得られる事もある). H が R 上有限生成射影的な場合の基礎理論は [2] に述べられている. このとき B_A と ${}_AB$ は上の条件から有限生成射影的になる.

このような H-ガロア拡大の中で, 通常のガロア拡大の normal base の存在に相当する条件をみたす拡大は cleft 拡大と言われる [3]. たとえば $H = R[\Gamma]$ を群環のホップ代数とするとき, A の $R[\Gamma]$-ガロア拡大とは Γ-graded. R-algebra $B = \bigoplus_{\sigma \in \Gamma} B_\sigma$ s.t. $B_\sigma B_\tau = B_{\sigma\tau}$, $B_1 = A$ の事

で，これが cleft とは各 $\sigma \in \Gamma$ に対し B_σ が unit をふくむこと，つまり B が Passman [4] のいみで crossed product $A * \Gamma$ を成すことである．

R-algebra A の H-cleft 拡大 B の (A, H)-同形類の全体を $Cleft(A, H)$ と書いてみよう．[3, Thm. 11, p. 815] に述べられているように，ある cohom. description ができる．

<u>Thm</u> $u \in R$ に対し $Cleft(A, H_u) \cong \overline{Aut_u}(A)$.

つまり A の cleft H_u-拡大の同形類は，A の outer u-aut. と 1:1 に対応する．$f \in Aut_u(A)$ に対応する A の cleft H_u-拡大は，前に述べた crossed product $A \underset{f}{*} H_u$ である．これは H_u の coalgebra 構造から来る自然な H_u-comodule 構造をもつ．$f, g \in Aut_u(A)$ に対し

$$f \equiv g \mod Inn_u(A) \iff A \underset{f}{*} H_u \underset{(A, H_u)}{\cong} A \underset{g}{*} H_u$$

である事，及び $A \underset{f}{*} H_u$ たちがすべての cleft H_u 拡大を尽す事が定理の内容である．

ここで，有限アーベル群 Γ に対する群 $Gal(R, \Gamma)$ に戻ろう．とくに巡回群 $\mathbb{Z}/(m)$ に対し

$$Gal(R, m) = Gal(R, \mathbb{Z}/(m))$$

(R の m 次巡回拡大のなす群)

を考える. 以下最後まで, R は素標数 p をもつとする. $m = p^n$ に対する $Gal(R, p^n)$ は次のように表示される:

<u>Thm</u> (Artin-Schreier-Witt) R が標数 p ならば

$$W_n(R) \xrightarrow{F - I} W_n(R) \longrightarrow Gal(R, p^n) \longrightarrow 0$$

なる完全列がある.

ここで W_n は長さ n の Witt ベクトルの群, F は Frobenius map, $F(a_0, a_1, \cdots, a_{n-1}) = (a_0^p, a_1^p, \cdots, a_{n-1}^p)$ を示す. 通常は R を体 k とし, $Gal(k, p^n)$ を $Hom_c(\Pi, \mathbb{Z}/(p^n))$ とした時の完全列が popular である [5, X, §3 a), p. 163].

$u \in R$ に対し, $Gal_u(R, p^n)$ を次のように定めよう. その元は, 次の pair (S, d) の同形類である: S は可換 R-algebra で R-progenerator, $d \in Der_u(S)$, $d^{p^n} = 0$ (従って d は u-aut.), $\{1, d, \cdots, d^{p^n-1}\}$ は $End_R(S)$ の左 S-free base. $Gal_u(R, p^n)$ は アーベル群 Γ に対する $Gal(R, \Gamma)$ と同様の群構造をもつ. $u = 1$ に対し $Gal_1(R, p^n)$ は $Gal(R, p^n)$ と自然に同形である.

$Gal_u(R, p^n)$ に対し，Artin-Schreier-Witt と類似の表示は得られないだろうか？ 中島[6]は小さい n に対し部分的にその問に答えている．

$$u^{p-1} : W_n(R) \longrightarrow W_n(R)$$

を $(u^{p-1}, 0, \cdots, 0)$ との Witt 乗法，つまり $u^{p-1}(a_0, a_1, \cdots, a_{n-1}) = (u^{p-1}a_0, u^{p^2-p}a_1, \cdots, u^{p^n-p^{n-1}}a_{n-1})$ とする．長さ n の Witt ベクトル $\underline{X} = (X_0, X_1, \cdots, X_{n-1})$, $\underline{Y} = (Y_0, Y_1, \cdots, Y_{n-1})$ の和を

$$\underline{X} + \underline{Y} = (S_0, S_1, \cdots, S_{n-1}), \quad S_i = S_i(\underline{X}, \underline{Y})$$

とする．$S_0 = X_0 + Y_0$, $S_1 = X_1 + Y_1 - \sum_{i=1}^{p-1} \frac{1}{p}\binom{p}{i} X_0^i Y_0^{p-i}$ である．$\underline{a} = (a_0, a_1, \cdots, a_{n-1}) \in W_n(R)$ に対し，多項式環 $R[\underline{X}] = R[X_0, X_1, \cdots, X_{n-1}]$ の次の relation

$$F(\underline{X}) = u^{p-1}\underline{X} + \underline{a}$$

による quotient algebra を $S_{\underline{a}}$ であらわそう．すなわち

$$S_{\underline{a}} = R[\underline{X}] / (X_i^p - S_i(u^{p-1}\underline{X}, \underline{a}), i = 0, \cdots, n-1)$$

もっと具体的には

$$X_0^p = u^{p-1}X_0 + a_0,$$
$$X_1^p = u^{p^2-p}X_1 + a_1 - \sum_{i=1}^{p-1} \frac{1}{p}\binom{p}{i}(u^{p-1}X_0)^i a_0^{p-i} \quad \text{etc.}$$

<u>Lem</u> (a) $R[\underline{X}]$ は

$$d(X_i) = \frac{S_i(\underline{X}, \underline{u}) - X_i}{u}, \quad i = 0, 1, \cdots, n-1$$

で定まる u-derivation d をもつ．ここで $\underline{u} = (u, u^p, \cdots, u^{p^{n-1}})$ とし，$R = \mathbb{Z}[u]$ 又は $\mathbb{F}_p[u]$（u 不定元）と思って計算する．

(b) $d^{p^n} = 0$．

(c) この d は，$\forall\, \underline{a} \in W_n(R)$ に対し，$S_{\underline{a}}$ の u-derivation を引起す．

(d) $(S_{\underline{a}}, d)$ の類は $Gal_u(R, p^n)$ に属する．

たとえば $d(X_0) = 1$, $d(X_1) = u^{p-1} - \sum_{i=1}^{p-1} \frac{1}{p}\binom{p}{i} u^{i-1} X_0^{p-i}$.

<u>Thm</u> (A-S-W の deformation) [7]．R が標数 p のとき $\underline{a} \in W_n(R)$ に対し，$\pi(\underline{a}) = [S_{\underline{a}}, d] \in Gal_u(R, p^n)$ とおくと次の完全列が成立つ：

$$W_n(R) \xrightarrow{F - u^{p-1}} W_n(R) \xrightarrow{\pi} Gal_u(R, p^n) \to 0.$$

本来の A-S-W 列は R-group scheme の完全列

$$0 \to (\mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z})_R \to W_{n_R} \xrightarrow{F - I} W_{n_R} \to 0$$

に，あるコホモロジー的手続きを施すことにより得られる．deformされた上の完全列についても同様の事情が成立する．

ホップ代数 $H_u = R[X, f_u(X)^{-1}]$ に対し，

$$H(u, p^n) = R[X]/(X^{p^n})$$

はその quotient Hopf algebra（n 回 iterated u-Frobenius map $H_{u^{p^n}} \longrightarrow H_u$ の Hopf-cokernel）である．$H(1, p^n)$ は $R[\mathbb{Z}/(p^n)]$ と同形だから

$$Sp_R\, H(1, p^n)^* \cong (\mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z})_R .$$

定義からすぐ分るように

$$Gal_u(R, p^n) = Gal(R, Sp_R\, H(u, p^n)^*)$$

と同一視される．($H(u, p^n)^*$ は dual Hopf algebra を表わす)．

<u>Thm</u> 標数 p の可換環 R 上で group scheme の exact 列

$$0 \longrightarrow Sp_R\, H(u, p^n)^* \longrightarrow W_{n_R} \xrightarrow{F - u^{p-1}} W_{n_R} \longrightarrow 0$$

が存在する [7].

このexact列に，通常のA-S-W列を得る場合と同じ手続きを施せば，我々のA-S-Wのdeformationがえられる．所で $Sp_R\, H(u,p^n)^*$ は u-Frobenius map

$$G_u \xrightarrow{p^n} G_{u^{p^n}}$$

の kernel ${}_{p^n}G_u$ の Cartier dual $({}_{p^n}G_u)^D$ であるから，このexact列は

$$({}_{p^n}G_u)^D \cong {}_{F-u^n}W_n \qquad (\text{☆})$$

と読みとれる．$u=0$ のときこれは $({}_{p^n}G_a)^D \cong {}_F W_n$ となり，これは Artin-Hasse の duality

$$({}_{F^n}W_m)^D \cong {}_{F^m}W_n \quad [1, V, §4, 4.7]$$

の special case ($m=1$) に他ならない．とすれば (☆) はもっと一般のある duality の特別な場合であるかもしれない．

ここに述べた u-calculus をとくに標数 p の $u=0$ と標数 0 の $u=1$ の間の deformation と捉え代数幾何に応用する事については，関口氏による次項の報告を参照されたい．

文献

[1] Demazure-Gabriel, Groupes algébriques, North-Holland, 197

[2] Kreimer-Takeuchi, Hopf algebras and Galois extensions of an algebra, Indiana U. Math. J. 30 (1981) 675-692.

[3] Doi-Takeuchi, Cleft comodule algebras for a bialgebra, Com. Alg. 14 (1986), 801-818.

[4] Passman, Algebraic crossed products, Contemp. Math. 43 (1985) 209-225.

[5] Serre, Corps locaux, Hermann, 1968.

[6] Nakajima, A certain type of commutative Hopf Galois extensions and their groups, Math. J. Okayama U. 24 (1982), 137-152.

[7] 竹内, Artin-Schreier-Witt 理論のdeformation, 「数学」寄稿 (to appear).