

局所 Weil 群の作用とそのトレースについて

東京大学数理科学研究科 落合理 (Ochiai, Tadashi)

本稿では講演の際に述べさせて頂いた Serre-Tate 及び Fontaine の予想に関する結果を記すとともに 講演の際にはあまり立ち入って触れることのできなかつた p -進の場合の結果や 証明の方法についてより詳しくかつ正確な記述を与えたい。

まず notation 等の復習から始めよう。

K を局所体とし, 有限体 $k = \mathbb{F}_{p^h}$ を K の剰余体とする. $P_0 = \widehat{\mathbb{Q}}_p^{\text{ur}}$ とおく. \bar{K} を K の分離閉包, $G_K := \text{Gal}(\bar{K}/K)$ を K の絶対 Galois 群 とし, G_K の惰性部分群を I_K とする. また, W_K を K の Weil 群 とする.

W_K は G_K の部分群で 次の完全列で定まるものである.

$$\begin{array}{ccccccccc} 0 & \longrightarrow & I_K & \longrightarrow & W_K & \xrightarrow{u} & \mathbb{Z} & \longrightarrow & \mathbb{Z}/p^h\mathbb{Z} & \longrightarrow & 0 \\ & & \parallel & & \cap & & \cap & & \parallel & & \\ 0 & \longrightarrow & I_K & \longrightarrow & G_K & \longrightarrow & \text{Gal}(\mathbb{F}_p/\mathbb{F}_p) & \longrightarrow & \text{Gal}(\mathbb{F}_{p^h}/\mathbb{F}_p) & \longrightarrow & 0. \end{array}$$

但し, $\sigma \in \text{Gal}(\mathbb{F}_p/\mathbb{F}_p) \cong \widehat{\mathbb{Z}}$ を geometric Frobenius ($x \mapsto x^{1/p}$) とするとき, u は $g \mapsto \sigma^{u(g)}$ で定義される写像である.

W_K の部分集合 W_K^+ を

$$W_K^+ := \{g \in W_K \mid u(g) \in \mathbb{Z}_{\geq 0}\}$$

と定める.

X を K 上の n -次元完備非特異代数多様体 とし, i を $0 \leq i \leq 2n$ なる自然数 とする. また l を素数 とする.

今, X に付随する W_K の表現 $V_l^i(X/K)$ を 次のようにして構成する.

1. $l \neq p$ のとき,

G_K 及び W_K は l -進 エタールコホモロジー 群

$$H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_l) := \varprojlim_n H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Z}/l^n\mathbb{Z}) \otimes_{\mathbb{Z}_l} \mathbb{Q}_l$$

に作用する. よって $V_l^i(X/K) := H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_l)$ と定義する. $V_l^i(X/K)$ は W_K の \mathbb{Q}_l -linear な作用をもつ 有限次元 \mathbb{Q}_l -ベクトル空間 である.

2. $l' = p$ のとき,

まず上のような $H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_p)$ はあまりよい表現ではない. よって我々は p -進ホッチ理論を使うことによりもとめる $V_p^i(X/K)$ を構成する. まず, B_{st} を Fontaine によって定義された p -進周期の環 ([Fo1] 参照) とするとき, K 上の完備非特異多様体 X に対して, $\widehat{D}_{\text{pst}}(H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_p))$ を

$$\widehat{D}_{\text{pst}}(H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_p)) := \varinjlim_{F \in \mathcal{F}} (B_{\text{st}} \otimes H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_p))^F$$

と定義する. ここで, \mathcal{F} は惰性群 I_K の開部分群全体からなる集合とする. この $\widehat{D}_{\text{pst}}(H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_p))$ は $P_0 = \widehat{\mathbb{Q}}_p^{\text{ur}}$ 上の有限次元ベクトル空間である. このとき, $D = \widehat{D}_{\text{pst}}(H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_p))$ は σ -linear な G_K の作用と, σ -linear operator $\varphi: D \rightarrow D$ をもつ. Fontaine [Fo2] は W_K の D への P_0 -linear な表現を

$$W_K \rightarrow \text{Aut}_{P_0}(D) \quad (g \mapsto \varphi^{-u(g)} \circ g)$$

と定義した (ここで, u は先の Weil 群の定義であらわれた写像 $W_K \rightarrow \mathbb{Z}$ である). $V_p^i(X/K)$ は上のようにして D にフロベニウス φ で twist して W_K の作用を与えた表現として定義される. $V_p^i(X/K)$ は W_K の P_0 -linear な作用を備えた有限次元 P_0 -ベクトル空間である.

このとき, 例えば次の様なことが期待される.

予想 (Serre-Tate, Fontaine). 上の様な X と $g \in W_K^+$ に対して g の作用のトレース $\text{Tr}(g^*; V_p^i(X/K))$ は l' の選び方によらない有理整数になる.

注意. 1. $i = 0$ (resp. $i = 2n$) とする. このとき, $V_p^i(X/K)$ は $l' \neq p$ ならば Tate twist $\mathbb{Q}_{l'}$ (resp. $\mathbb{Q}_{l'}(-n)$) と同型であり, $l' = p$ のときは P_0 (resp. $P_0(-n)$) と同型である. よって $i = 0, 2n$ では予想は直ちにしたがう.

2. $i = 1$ (resp. $2n - 1$) とするとコホモロジー $V_p^i(X/K)$ は X のピカル多様体 (resp. アルバナーゼ多様体) とよばれるアーベル多様体 A_X^i が存在して W_K の表現として $V_p^i(X/K) \cong V_p^1(A_X^i/K)$ となる. このとき Grothendieck によるアーベル多様体の半安定還元定理 (SGA7-I) によって $i = 1, 2n - 1$ ならば上の予想は正しい.

3. X がアーベル多様体 とするとき コホモロジー $V_l^i(X/K)$ は $V_l^1(X/K)$ の i 階外巾 $\wedge^i V_l^1(X/K)$ と同型なことが知られている. よって X がアーベル多様体 のときは 任意の i で予想は正しいことがわかる.
4. X が さらに good reduction をもつとする. $l \neq p$ のときは Deligne によって証明された Weil 予想 [De] によって W_K^+ の $V_l^i(X/K)$ への作用のトレースは l の選び方によらない有理整数となる. また $l = p$ のときは [KM] によりトレースはある $l \neq p$ での W_K^+ の $V_l^i(X/K)$ への作用のトレースと一致する. よって, この場合は任意の i で予想は正しい (正確には [KM] は射影空間内での 超平面切断の議論を用いるため 一般の完備非特異多様体 全てを扱ってはいない. 射影的 ではない 完備非特異多様体 に対しては [C] Theorem 2.2 を用いればよい).

主結果とその証明について述べる前に 少し 関連する 話題の一つとして Hasse-Weil L -函数の 定義について 説明する. 数論及び数論的幾何学の最も大事なテーマとして 代数体上定義された多様体の arithmetic(有理点の様子やガロア表現など) を 調べる ことがある. X を 有理数体 \mathbb{Q} 上定義された完備非特異代数多様体 とする. X に対する Hasse-Weil L -函数は次のように定義される.

$$L(X, i, s) := \prod_{p: \text{素数}} (1 - \text{Frob}_p \cdot p^{-s} | (V_l^i(X/\mathbb{Q}_p))^{I_p})^{-1}.$$

$L(X, i, s)$ は $\text{Re}(s) > \frac{1}{2} + 1$ で絶対収束し, 全複素平面へ正則に解析接続されると予想されている. 前述の注意の 4 を用いることにより X が 素数 p で good reduction をもつならば p での Euler 因子 $(1 - \text{Frob}_p \cdot p^{-s} | (V_l^i(X/\mathbb{Q}_p))^{I_p})^{-1}$ は l の選び方によらずに定まることが容易に確かめられる. ところが, p を X が p で bad reduction をもつような 有限個の素数のうちの一つとすると p での Euler 因子は一般には l の選び方によらずに定まるかどうかは わかっていない. ただ前述の Serre-Tate, Fontaine による予想を仮定すると bad reduction をもつ場合にも p での Euler 因子が l の選び方によらないことが 容易に確かめられる. このような 事実からも 先程の 予想の大切さは 感じとって頂けることと思う.

さて, 今回の主結果は以下の様なものである.

定理 A. X を K 上の完備非特異代数多様体 とし, g を W_K^+ の元とする.

このとき, 交代和 $\sum_i (-1)^i \text{Tr}(g^*; V_l^i(X/K))$ は l の選び方によらない有理整数になる.

この定理からただちに次のことが導かれる.

系 B. 次のいずれかの場合には, すべての i で予想は正しい.

1. X は K 上の完備非特異代数曲面 (つまり, $\dim X = 2$)
2. X は射影空間 \mathbb{P}_K^n 中の非特異完全交叉多様体

定理 A からただちに得られる系として, Swan 導手の l -independence がある. Swan 導手の定義と結果の正確な記述は以下のとおりである. $l \neq p$ のとき, Grothendieck のモノドロミー定理 (SGA7 exp.1) によって I_K の $V_l^i(X/K)$ への作用はある開部分群 $J \subset I_K$ 上では unipotent な作用を持つ. また, $l = p$ のときにも de Jong の結果より $H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_p)$ は potentially semi-stable であるから, I_K の $V_p^i(X/K)$ への作用はある開部分群 $J \subset I_K$ 上で unipotent な作用を持つ (例えば, [Be] p307 参照). $b_{I_K/J}$ を I_K/J の Swan 指標, φ_i を I_K/J の $V_l^i(X/K)$ への指標とする. これを用いて, $V_l^i(X/K)$ の Swan 導手 $\text{Sw}(X, K, i, l)$ を

$$\text{Sw}(X, K, i, l) := \frac{1}{\#I_K/J} \sum_{g \in I_K/J} (b_{I_K/J}(g^{-1}) \cdot \varphi_i(g))$$

と定義する. これは $V_l^i(X/K)$ への惰性群 I_K の作用がどれくらい wild であるかを量る不変量である. 次も定理 A 及び系 B からただちに得られる結果である.

系 C. このとき $\sum_{0 \leq i \leq 2n} (-1)^i \text{Sw}(X, K, i, l)$ は l の選び方によらない. 特に X が系 B で述べられた様なものであれば任意の i に対して $\text{Sw}(X, K, i, l)$ は l の選び方によらない.

系 B より, 先に述べた Hasse-Weil L -函数 の定義については 次の事がわかる.

系 D. X を 非特異完備代数曲面 または 非特異完備完全交差多様体 とするとき Hasse-Weil L -函数 $L(X, i, s)$ は 任意の $0 \leq i \leq 2\dim X$ で l の選び方によらない well-defined な函数となる.

以下, 主に $l' \neq p$ の場合で 定理 A の 証明の概略を 述べる. 実際 我々が示すのは 定理 A より もう少し一般的な 次の形の 定理である.

定理 A'. X を K 上の (必ずしも完備非特異とは限らない) 代数多様体 とし, g を W_K^+ の元とする. このとき, 交代和 $\sum_i (-1)^i \text{Tr}(g^*; H_c^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_{l'}))$ は l' の選び方によらない有理整数になる (但し, ここで $H_c^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_{l'})$ は compact support エタールコホモロジー とする).

X が 完備な多様体 ならば コンパクト な台をもつ エタールコホモロジー $H_c^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_{l'})$ と 通常のエタール コホモロジー $H^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_{l'})$ は 一致する. よって 定理 A' から 定理 A は 直ちに得られる. 定理 A' の 証明は semi-stable reduction をもつ場合にまず 示し, 一般の場合は de Jong の理論を用いて semi-stable reduction の場合に帰着する. 簡単のため 局所体 K の標数は 0 であると仮定しておく.

1. まず, X' が ある局所体 K' 上の strict semi-stable reduction を もつ多様体の場合を考える. つまり X' は 整数環 $\mathcal{O}_{K'}$ 上の 正則 かつ 固有平坦な モデル $\mathcal{X}'/\mathcal{O}_{K'}$ をもち, special fiber $Y' = \mathcal{X}'/\mathcal{O}_{K'} \otimes_{\mathcal{O}_{K'}} k'$ は $\mathcal{X}'/\mathcal{O}_{K'}$ の中の strict normal crossing divisor であるとする. このとき, Rapoport-Zink によって構成された weight スペクトル系列 [R-Z]

$${}_w E_1^{a,b} = H^{a+b}(\bar{Y}', \text{gr}_{-a}^w R\psi(\mathbb{Q}_{l'})) \Rightarrow E^{a+b} = H^{a+b}(X' \otimes_{K'} \bar{K}', \mathbb{Q}_{l'})$$

がある. このスペクトル系列は $\text{Gal}(\bar{K}'/K')$ の作用と両立する. $Y' = \bigcup_{1 \leq i \leq r} Y'_i$ (Y'_i は smooth divisor) とかけるから,

$$Y'^{(m)} = \prod_{1 \leq i_1 < \dots < i_m \leq r} (\bigcap_{i_j} Y'_{i_j}),$$

とおく. $Y'^{(m)}$ は K' の剰余体 k' 上の $d+1-m$ 次元の完備非特異多様体である. このとき 上のスペクトル系列の E_1 -term は

$${}_w E_1^{-r, n+r} = \bigoplus_{q, r+q \geq 0} H^{n-r-2q}(\bar{Y}'^{(r+1+2q)}, \mathbb{Q}_{l'})(-r-q).$$

とかけることが知られている. $\bar{Y}'^{(m)}$ 上の 絶対的フロベニウス自己準同型を f_{ab} とするとき, f_{ab} は $H^i(\bar{Y}'^{(m)}, \mathbb{Q}_{l'})$ 上に自明な作用を引き起こす. よって

$g' \in W_{K'}^+$ の E_1 -term への作用は $g' \circ f_{ab}^{u(g')}$ の作用と同じである。 $g' \circ f_{ab}^{u(g')}$ は $\bar{Y}^{(m)}$ の定義体 \bar{k} 上で定義された幾何的な自己準同型であるから エターナル コホモロジー に対する Lefschetz の 跡公式:

$$(\Gamma_{f_{ab}^{u(g')} \circ g'} \cdot \Delta_{\bar{Y}^{(m)}}) = \sum_i (-1)^i \text{Tr}(g'^*; H^i(\bar{Y}^{(m)}, \mathbb{Q}_l)),$$

が成り立つ。ここで $\Delta_{\bar{Y}^{(m)}}$ は $\bar{Y}^{(m)} \times \bar{Y}^{(m)}$ の中の対角的サイクルであり、 $\Gamma_{f_{ab}^{u(g')} \circ g'}$ は 幾何的自己準同型 $f_{ab}^{u(g')} \circ g'$ のグラフである。一方で スペクトル系列に関する一般論より、

$$\begin{aligned} \sum_i (-1)^i \text{Tr}(g'^*; H_c^i(X \otimes_{\bar{K}} \bar{K}, \mathbb{Q}_l)) &= \sum_i (-1)^i \text{Tr}(g'^*; E^i) \\ &= \sum_{a,b} (-1)^{a+b} \text{Tr}(g'^*; E_1^{a,b}) \\ &= \sum_n \left(\sum_{s \geq 0, t \geq 0} (-1)^n \text{Tr}(g'^*; H^{n-s-t}(\bar{Y}^{(1+s+t)}, \mathbb{Q}_l)(-t)) \right) \\ &= \sum_{u \geq 0} \left(\sum_{0 \leq t \leq u} \left(\sum_n (-1)^n \text{Tr}(g'^*; H^{n-u}(\bar{Y}^{(1+u)}, \mathbb{Q}_l)(-t)) \right) \right). \end{aligned}$$

が成り立つ。よって先の Lefschetz の 跡公式 よりトレースの交代和

$$\sum_i (-1)^i \text{Tr}(g'^*; H_c^i(X \otimes_{\bar{K}} \bar{K}, \mathbb{Q}_l))$$

は素数の 選び方によらないことがわかる。

- 次に、 X が semi-stable reduction をもつとは限らない一般の多様体の場合を考えよう。まず X が 完備 としてよいことが簡単な議論でわかる。このときは、 X が semi-stable reduction をもつ多様体で dominate できるという de Jong の結果 ([dJ1], [dJ2]) を用いて先の場合に帰着するという アイディアで X の次元に関する帰納法によって 証明をすすめていく。もう少し詳しくいうと de Jong の結果 ([dJ1], [dJ2]) を 組み合わせて次のことがわかる。

命題 . \mathcal{X} を X の \mathcal{O}_K 上の固有平坦な モデルとする。このとき、 K の有限次拡大 K' 、有限群 G 、 $\mathcal{O}_{K'}$ 上の有限群 G の作用をもつ strict semi-stable variety $\mathcal{X}'_{/\mathcal{O}_{K'}}$ と有限群 G の作用と両立する generically finite な射 $\mathcal{X}'_{/\mathcal{O}_{K'}} \rightarrow \mathcal{X}_{/\mathcal{O}_K}$ で K 上の 双有理的写像 $(X'/G)_{/K} \rightarrow X_{/K}$ を引き起こすものがある。但し、 $X'_{/K'}$ は $\mathcal{X}'_{/\mathcal{O}_{K'}}$ の generic fiber とする。(ここで G は $\mathcal{X}_{/\mathcal{O}_K}$ 上には自明に作用することまた G の $\mathcal{X}'_{/\mathcal{O}_{K'}}$ 上への作用は base $\mathcal{O}_{K'}$ にも作用しうるものであることに注意したい)

上の 命題にあらわれた $X'_{/K'}$ と $W_{K'}^+$ の $H_c^i(X' \otimes_{\bar{K}'} \bar{K}, \mathbb{Q}_l)$ への作用に対しては先の semi-stable reduction をもつ場合の議論より、トレースの交代和の l -independence が導かれる。このことと、有限群によるスキームの商

をとったときのコホモロジーの関係を調べることにより, 任意の $g \in W_K^+$ に対して $\sum_i (-1)^i \text{Tr}(g^*; H_c^i((X'/G) \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_l))$ は l の選び方によらない有理整数になることがわかる.

さて, X と X'' を互いに双有理同値な K 上の代数多様体とする. U を X と X'' の共通の空でない部分スキームとする. 次のようなコンパクト台をもつエタールコホモロジーの完全列を考えよう:

$$\begin{aligned} \dots &\longrightarrow H_c^i(\bar{U}, \mathbb{Q}_l) \longrightarrow H_c^i(\bar{X}, \mathbb{Q}_l) \longrightarrow H_c^i(\bar{X} - \bar{U}, \mathbb{Q}_l) \longrightarrow \dots, \\ \dots &\longrightarrow H_c^i(\bar{U}, \mathbb{Q}_l) \longrightarrow H_c^i(\bar{X}'', \mathbb{Q}_l) \longrightarrow H_c^i(\bar{X}'' - \bar{U}, \mathbb{Q}_l) \longrightarrow \dots. \end{aligned}$$

この完全列によってトレースの交代和 $\sum_i (-1)^i \text{Tr}(g^*; H_c^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_l))$ とトレースの交代和 $\sum_i (-1)^i \text{Tr}(g^*; H_c^i(X'' \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_l))$ との差はより低い次元の多様体 $X - U$, $X'' - U$ のエタールコホモロジー上への作用のトレースの交代和で書ける. つまり次が成立する.

補題. X と X'' が互いに双有理同値な K 上の d 次元代数多様体とする. このとき, $d-1$ 次元以下の全ての代数多様体にたいして定理 A' が正しいと仮定する. このとき, $\sum_i (-1)^i \text{Tr}(g^*; H_c^i(X'' \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_l))$ は l の選び方によらない有理整数になるならば $\sum_i (-1)^i \text{Tr}(g^*; H_c^i(X \otimes_K \bar{K}, \mathbb{Q}_l))$ も l の選び方によらない有理整数になる.

この補題を $X'' = X'/G$ として適用して, $l \neq p$ 場合に定理 A' の証明が帰納法の仮定に帰着される.

$l = p$ のときも Mokrane [Mo] によって構成された Rapoport-Zink の weight スペクトル系列の p -進版と crystalline cohomology に対する Lefschetz の跡公式を用いることでほぼ同様の方針で示される. ただ $l \neq p$ の場合にみたように証明の途中で必ずしも完備非特異ではない多様体からくるガロア表現を扱う必要があり, そのような表現に対しては p -進ホッチ理論が適用できないというテクニカルな障害が生ずる. このような困難は p -進表現の圏の Grothendieck 群を考えることによって切り抜けることができるが少しテクニカルな事柄であるためここでは詳細は省くことにする. 詳しくは [O] を参照して頂きたい.

最後に, この場を借りて, 講演の機会を与えて下さった伊原 康隆 先生に感謝したい. また, この論説を書くにあたって助言をいただいた方々にも感謝したい. 特に 東北大学の志甫 淳 さんには文献 [C] について教えていただいた.

REFERENCES

- [Be] Berthelot, P. *Altérations de variétés algébriques (d'après A. J. de Jong)*, Séminaire Bourbaki, Vol. 1995/96. Astérisque **241**, 273–311, 1997.
- [C] Chiarellotto, B. *Weights in rigid cohomology — Applications to unipotent F -crystals*, preprint, (1997)
- [De] Deligne, P. *La conjecture de Weil II*, Publ. Math. IHES **52** (1980), 137–252
- [dJ1] de Jong, A. J., *Smoothness semistability and alterations*, Publ. Math. IHES **83** (1996), 51–93
- [dJ2] de Jong, A. J., *Families of curves and alterations*, Ann. de l'institut Fourier **43** (1997), 301–337.
- [Fo1] Fontaine, J. M., *Le corps des périodes p -adiques*, Périodes p -adiques, Astérisque **223** (1994), 59–111
- [Fo2] Fontaine, J. M., *Représentations l -adiques potentiellement semi-stables*, Périodes p -adiques, Astérisque **223** (1994), 321–348
- [KM] Katz, N. and Messing, W. *Some consequences of the Riemann hypothesis for varieties over finite fields*, Invent. Math. **23** (1974), 73–77.
- [Mo] Mokrane, A., *La suite spectrale des poids en cohomologie de Hyodo-Kato*, Duke Math. **72** (1993), 301–337
- [O] Ochiai, T., *l -independences of trace of monodromy*, preprint,
- [R-Z] Rapoport, M. and Zink, T., *Über die lokale Zetafunktion von Shimuravararietäten, Monodromiefiltration und Verschwindende Zyklen in ungreicher Charakteristik*, Inv. Math. **68** (1982), 21–201
- [Se] Serre, J. P., *Représentations linéaires des groupes finis* Paris, Hermann, 1971