

CM 型の Hodge Cycle について

愛知工業大学 柳井裕道 (Hiromichi Yanai)

Hodge cycle は、 ℓ 進表現やゼータ関数と密接な関係があり、代数多様体の数論的な性質を調べるうえで非常に重要である。本稿では、CM 型のアーベル多様体の場合に、特に例外的な Hodge cycle がいつ存在するかという問題について解説する。この場合、Hodge cycle は不分岐類体 ([Y 3], [Y 4]) や Jacobi 和 ([A], [Y 2]) などの CM 体の数論的対象と直接結びついている。

1. 例外的な Hodge Cycle.

A を \mathbb{C} 上の type (K, S) の d 次元 CM 型のアーベル多様体とする。(定義は [S-T], [L] 参照.) $0 < p < d$ なる p に対して、

$$H^{2p}(A, \mathbb{Q}) \cap H^p(A, \Omega^p)$$

の元を余次元 p の Hodge cycle という。次の包含関係はよく知られている。

$$\{\text{divisor の class で生成される cycles}\} \subseteq \{\text{algebraic cycles}\} \subseteq \{\text{Hodge cycles}\}$$

第2の包含関係が等号であろうというのが Hodge 予想である ([S 2])。Divisor の class で生成されない Hodge cycle を *exceptional Hodge cycle* という。Exceptional な Hodge cycle の存在は、Hodge 予想の証明/反例を考えるうえで重要なことはもちろんであるが、ideal 群や Gauss 和のような数論的対象にある種の degeneration を引き起こすので、非常に興味深い。

アーベル多様体 A について、任意の $k \geq 1$ に対して積 A^k 上に exceptional な Hodge cycle がないとき、 A は *stably nondegenerate* であるという ([H 1])。Stably nondegenerate な A に対しては Hodge 予想が成立している。あきらかに、 A が stably nondegenerate なら A 自身の上に exceptional な Hodge cycle は存在しないが、Ribet は (CM 型の場合に) この逆が成り立つかという問題を提起した。これに関しては、

- 準同型の体 K が \mathbb{Q} 上のアーベル拡大の時は成立する (H. Lenstra Jr.),
- 一般の場合は反例あり (P. White),

であることがわかっている ([W]). White の反例は $\text{Gal}(K/\mathbb{Q}) \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/5\mathbb{Z} \times D_5$ であるような 100 次元のアーベル多様体である.

A が素数次元なら exceptional Hodge cycle を持たないことがわかっている ([T], [R 2], [Y 1]).

以下に exceptional Hodge cycle の存在について, 知られている結果 (の一部) を列挙する. A は $\text{type}(K, S)$ の simple な CM 型アーベル多様体とする.

- 1960 年代後半に, Mumford は 4 次元の A で exceptional Hodge cycle を持つものを構成した. (具体的な最初の例? [P] 参照.)
- K が 円分体の場合に exceptional Hodge cycle を持つ数多くの例が知られている. ([S 1], [R 1] 参照.)
- 特に, 奇素数 ℓ に対して A が代数曲線 $y^\ell = x^a(1-x)$ ($1 \leq a \leq \ell-2$) の Jacobian variety (Fermat 型のアーベル多様体) で simple のときは, K は円分体 $\mathbb{Q}(\zeta_\ell)$ であって, A が exceptional Hodge cycle を持つことと, $(\mathbb{Z}/\ell\mathbb{Z})^\times$ の奇指標 χ で $\chi(a+1) = \chi(a) + 1$ をみたすものが存在することが同値である. このような (ℓ, a) は $(67, 6), (127, 11), (139, 16), \dots$ など無限組存在する. ([G] 参照.) この場合, Hodge cycle はすべて algebraic であることがわかっている (Shioda [S 1]).
- K が \mathbb{Q} 上特別の形の Galois 拡大である場合に Dodson の詳しい研究がある ([D]).
- ℓ が $\ell \equiv 1 \pmod{4}$ なる素数のとき, genus $\frac{\ell-1}{2}$ の超楕円曲線で, その Jacobian variety A 上 exceptional Hodge cycle が存在するものがある. ここでは, $K = \mathbb{Q}(\zeta_\ell + \zeta_\ell^{-1}, \sqrt{-1})$ である ([TTV]).
- K が \mathbb{Q} 上のアーベル拡大で $\text{Gal}(K/\mathbb{Q}) \cong \mathbb{Z}/pqr\mathbb{Z}$ (p, q, r は相異なる奇素数) のとき, K を準同型の体とする A で exceptional Hodge cycle を持つものがある. (Lenstra の “ pqr -example”, [R 1] 参照.)

CM 体 K を複素数体 \mathbb{C} の部分体とみなし, Γ を K の \mathbb{C} への埋め込み全体とする. $H_1(A, \mathbb{Q}) \cong K$ であるから

$$H^1(A, \mathbb{C}) = \text{Hom}_{\mathbb{Q}}(H_1(A, \mathbb{Q}), \mathbb{C}) \cong \text{Hom}_{\mathbb{Q}}(K, \mathbb{C}) = \bigoplus_{\sigma \in \Gamma} \mathbb{C}\sigma$$

であって, Hodge 分解は

$$H^n(A, \mathbb{C}) = \bigoplus_{\substack{p+q=n \\ p \geq 0, q \geq 0}} \left(\bigwedge^p H^{1,0} \otimes \bigwedge^q H^{0,1} \right), \quad H^{1,0} \cong \bigoplus_{\sigma \in S} \mathbb{C}\sigma, \quad H^{0,1} \cong \bigoplus_{\tau \in S\rho} \mathbb{C}\tau$$

と表せる. (ρ は complex conjugation.) これにより, $(H^{2p}(A, \mathbb{Q}) \cap H^{p,p}) \otimes \mathbb{C}$ の元 (complex valued Hodge cycle) を Γ の元で記述でき ([P]), さらに Hodge cycle の, ideal や Gauss 和への作用を考えることもできる ([Y 2], [Y 3]).

2. ひとつの構成法.

前節の例を眺めていると, CM 体 K が多くの部分 CM 体を含むとき exceptional な Hodge cycle が生じやすいということが見て取れる. 実際, 次の定理が成り立つ ([Y 4]).

定理. $K \supset K_1 \supset K_2$ を \mathbb{C} 内の相異なる CM 体とし, $\Gamma, \Gamma_1, \Gamma_2$ をこれらの体の \mathbb{C} への埋め込み全体とする. $\pi_1: \Gamma \rightarrow \Gamma_1, \pi_{12}: \Gamma_1 \rightarrow \Gamma_2$ で canonical surjections を表す. K の CM 型 $S \subset \Gamma$ で次の条件をみたすものを取る.

$$(*) \left\{ \begin{array}{l} \text{各 } \mu \in \Gamma_2 \text{ に対して非負整数 } a_\mu \text{ が存在して,} \\ \pi_{12}(\tau) = \mu \text{ となるすべての } \tau \in \Gamma_1 \text{ について } \#\{\sigma \in S \mid \pi_1(\sigma) = \tau\} = a_\mu. \end{array} \right.$$

このとき, type (K, S) の CM 型アーベル多様体 A が simple なら, A 上に exceptional な Hodge cycle が存在する.

注意. (1) $K \supset K_1 \supset K_2$ が与えられたとき (*) をみたす S の取り方はたくさんあって, ほとんどの場合 A は simple になる.

(2) このような A に対して, Hodge 群の次元の上からの評価もできる.

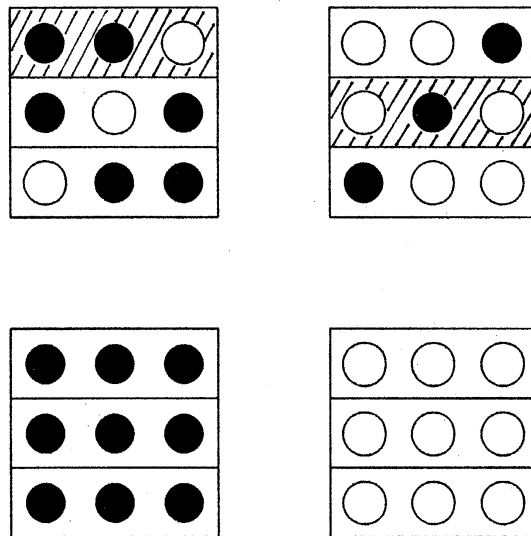
(3) ある $\mu \in \Gamma_2$ について $\tau, \tau' \in \Gamma_1$ が $\tau \neq \tau', \pi_{12}(\tau) = \pi_{12}(\tau') = \mu$ をみたすとき,

$$\left(\bigwedge_{\substack{\sigma \in \Gamma \\ \pi_1(\sigma) = \tau}} \sigma \right) \wedge \left(\bigwedge_{\substack{\sigma' \in \Gamma \\ \pi_1(\sigma') = \tau'\rho}} \sigma' \right)$$

は A 上の (complex valued) exceptional Hodge cycle である.

前節の最後に述べたように, cohomology 群 $H^n(A, \mathbb{C})$ の元は Γ の元を用いて表すことができ, その中で $\text{Aut}(\mathbb{C})$ の作用で特別の振る舞いをするものが Hodge cycle となる. 上の定理においては, Γ を Γ_1, Γ_2 の元 (coset) に分けることによって, $\text{Aut}(\mathbb{C})$ の作用を統制しているのである (分割統治!).

例. K として 37 分体 $\mathbb{Q}(\zeta_{37})$ をとり, K_1, K_2 をそれぞれ \mathbb{Q} 上 12 次と 4 次の部分体とする. CM 型 $S \subset \Gamma = \text{Gal}(K/\mathbb{Q}) \cong (\mathbb{Z}/37\mathbb{Z})^\times$ を定理の条件 (*) をみたすようにとる. 例えば $S = \{1, 2, 3, 7, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 24, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33\}$. このとき, $\text{type}(K, S)$ の 18 次元アーベル多様体 A 上には余次元 3 の exceptional Hodge cycle が存在する. (例えば 1, 10, 21, 25, 26, 28 に対応する Γ の元の外積を取ったもの.) この cycle が algebraic である (または, algebraic でない!?) ことを示すことは, 非常に面白い問題である.



分割統治の図: 36 個の丸は Γ の元, 12 個の長方形は Γ_1 の元 (coset), 4 個の正方形は Γ_2 の元 (coset) を表す. 複素共役 ρ は左右の平行移動を引き起こす. S として例えば黒丸の元が取れる. 斜線部分はひとつの exceptional な Hodge cycle 表す.

同様の方法で, 2つの CM 型アーベル多様体 A, B で, A, B 各々の上には exceptional Hodge cycle が存在しないが, 積 $A \times B$ 上には存在するようなものを作る

ことが出来る。 A, B が IV 型でない (従って CM 型でない) アーベル多様体のときは、各々が stably nondegenerate なら $A \times B$ もそうであることが知られている ([H 2]) .

参考文献

- [A] N. Aoki: Abelian Fields Generated by a Jacobi Sum, *Comm. Math. Univ. Sancti Pauli*, Vol.45 No.1 (1996) 1–21.
- [D] B. Dodson: The structure of Galois groups of CM-fields, *Trans. Amer. Math. Soc.* vol.283 no.1 (1984) 1–32.
- [G] R. Greenberg, On the Jacobian variety of some algebraic curves, *Comp. Math.* vol.42, Fasc. 3 (1981) 345–359.
- [H 1] F. Hazama: Algebraic cycles on certain abelian varieties and powers of special surfaces, *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo IA* vol.31 (1985) 487–520.
- [H 2] —: Algebraic cycles on nonsimple abelian varieties, *Duke Math. J.* vol.58 no.1 (1989) 31–37.
- [L] S. Lang: “Complex Multiplication”, Springer (1983).
- [P] H. Pohlmann: Algebraic cycles on abelian varieties of complex multiplication type, *Ann. of Math.(2)* vol.88 (1968) 161–180.
- [R 1] K. A. Ribet: Division fields of abelian varieties with complex multiplication, *Mém. Soc. Math. France*, No.2 (1980) 75–94.
- [R 2] —: Hodge classes on certain types of abelian varieties, *Amer. J. Math.* vol.105 (1983) 523–538.
- [S-T] G. Shimura and Y. Taniyama: “Complex Multiplication of Abelian Varieties and Its Application to Number Theory”, *Publ. Math. Soc. Japan* (1961).
- [S 1] T. Shioda: Algebraic Cycles on Abelian Varieties of Fermat type, *Math. Ann.* vol.258 (1981) 65–80.

- [S 2] —: What is known about the Hodge Conjecture?, *Advanced Studies in Pure Math.* vol.1 (1983) 55–68.
- [T] S. G. Tankeev: Cycles on simple abelian varieties of prime dimension, *Math. USSR Izv.* vol.20, no.1 (1983) 157–171.
- [TTV] W. Tautz, J. Top and A. Verberkmoes: Explicit hyperelliptic curves with real multiplication and permutation polynomials, *Can. J. Math.* Vol.43(5) (1991) 1055–1064.
- [W] S. P. White: Sporadic cycles on CM abelian varieties, *Compositio Math.* vol.88 (1993) 123–142.
- [Y 1] H. Yanai: On the rank of CM-types, *Nagoya Math. J.* vol.97 (1985) 169–172.
- [Y 2] —: 「CM 型の Hodge Element」 整数論シンポジウム報告書 (香川大学) (1993) 96–103.
- [Y 3] —: On Degenerate CM-types, *J. of Number Theory*, vol.49, No.3 (1994) 295–303.
- [Y 4] —: Hodge Cycles and Unramified Class Fields, to appear.