

12 Galois 拡大再論

12.1 Galois 拡大

命題 12.1. 代数拡大 L/K について次は同値

- (1) L/K は Galois
 - (2) L/K は正規かつ分離的
 - (2)' $\forall x \in L$ に対し、その最小多項式は分離的かつ $L[X]$ において一次因子の積に分解される。
 - (3) L/K はある分離多項式族 $(f_i)_{i \in I}$ の最小分解体
- さらに、 L/K が有限次なら次も同値
- (4) $[L : K] = h_L(L) (= |\text{Aut}_K(L)|)$

Proof. Ω を K の代数閉包とする。

(2) \Leftrightarrow (2)' は正規の定義 (??) と系 (??) と多項式の分離性の定義 (??) から明らか。

(1) \Rightarrow (2)

$\forall x \in L$ とその最小多項式 $f \in K[X]$ をとる。また、 $Y_x := \{\sigma(x) | \sigma \in \text{Aut}_K(L)\}$ と定めるとこれは x の Ω における共役元の集合の部分集合になり、 $\sigma \in \text{Aut}_K(L)$ から $Y \subset L$ である。命題 (??) の (1) \Leftrightarrow (3) から x の共役元はすべて f の根なので高々 $\deg(f)$ 個しかないので Y_x は有限集合。 $g := \prod_{y \in Y_x} (X - y)$, $n := \deg(g)$ とする。 y はすべて異なるから単根なので g は分離的である。また、 y は x の共役元より f の根でもあるから g のすべての根は f の根より $g|f$ となる。

$y \in Y_x \subset L$ よりその元から作られる基本対称式は L に含まれるので $g = \sum_{i=1}^n a_i X^i$, $a_i \in L$ と書ける。 $\sigma g = \sum_{i=1}^n \sigma(a_i) X^i$ とすると係数だけに σ をかけているから $(\sigma g)(X) = \prod_{y \in Y_x} (X - \sigma(y))$ となる。ここで $y \in Y_x$ より $y = \tau(x)$, $\tau \in \text{Aut}_K(L)$ となるものが存在する。 $\text{Aut}_K(L)$ は自己同型写像であるから $\sigma \circ \tau \in \text{Aut}_K(L)$ より $\sigma(y) = \sigma \circ \tau(x) \in Y_x$ となる。ここで Y_x は有限集合であることと σ は体の準同型より単射なのでそれぞれの y は σ によりそれぞれ異なる Y_x の元に行く。したがって $(\sigma g)(X) = \prod_{y \in Y_x} (X - y) = g(X)$ となるから a_i は $\forall \sigma \in \text{Aut}_K(L)$ によって動かされない。 L/K が Galois より $L^{\text{Aut}_K(L)} = K$ より $a_i \in K$ であるから $g \in K[X]$ である。

$g, f \in K[X]$ で $g|f$ より f の最小性から $f = g$ なので任意の $x \in L$ の最小多項式は $f = \prod_{y \in Y_x} (X - y)$ と $L[X]$ 上で一次因子の積に分解されるので L/K は正規。また、 $g(=f)$ は分離的でもあったので任意の最小多項式が分離的より系 (??) より L/K は分離的であるので L/K は正規かつ分離的。

(2) \Rightarrow (1)

$L = K$ のとき $L^{\text{Aut}_K(L)} = K^{\text{Aut}_K(K)} = K$ で成立。 $L \neq K$ のとき $L \supsetneq K$ であるから $\forall x \in L - K$ をとる。これがある $\sigma \in \text{Aut}_K(L)$ で $\sigma(x) \neq x$ となればよい。

x の最小多項式を $f \in K[X]$ とすると $x \in L - K$ より $\deg(f) > 1$ であり、仮定から L/K が分離的より系 (??) から f が単根を持つので定義より分離的だから $f(y) = 0$ で $y \neq x$ であるような元 $y \in \Omega$ が存在する。 y の K 上の最小多項式も f なので命題 (??) の (2) \Leftrightarrow (3) から $\sigma(x) = y$ となるような $\sigma \in \text{Aut}_K(\Omega)$ が存在する。仮定から L/K は正規なので命題 (??) の (1) \Leftrightarrow (3) から $\sigma(L) = L$ より $\sigma|_L \in \text{Aut}_K(L)$ となる。この σ により $\sigma(x) = y \neq x$ なので x は固定されないから固定されるのは K の元のみなので $L^{\text{Aut}_K(L)} = K$ となり定義より L/K は Galois である。

(2) \Leftrightarrow (3)

命題 (??) の (1) \Leftrightarrow (5) より「規 \Leftrightarrow ある多項式族 $(f_i)_{i \in I}$ の最小分解体」が言えている。その多項式族は $\forall x \in L$ の最小多項式の族であったので系 (??) より「分離的 \Leftrightarrow 多項式族のすべての多項式が分離的」が言えている。

(2) \Leftrightarrow (4)

有限次拡大のとき系 (??) から「正規 $\Leftrightarrow [L : K]_s = h_L(L)$ 」が言えている。定義より「分離的 $\Leftrightarrow [L : K] = [L : K]_s$ 」なので「正規かつ分離的 $\Leftrightarrow [L : K] = [L : K]_s = h_L(L)$ 」となり示された。 \square

12.2 多項式の Galois 群

定義 12.2. K : 体、 $f \in K[X] - K$: 分離多項式、 $L_f: f$ の K 上の最小分解体とするときその根をすべて添加しているので命題 (??) から L_f/K は有限次だから命題 (12.1) の (1) \Leftrightarrow (3) から L_f/K は有限次 Galois 拡大である。このとき $\text{Gal}(L_f/K)$ を f の K 上の Galois 群という。

命題 12.3. 分離多項式 $f \in K[X] - K$ にたいしてその最小分解体 L_f を考える。 Ω を K の代数閉包で L_f を含むもの、 $W := \{x \in \Omega \mid f \text{ の根 } \}$ とする。 f は分離多項式なので $|W| = n := \deg(f)$ となる。このとき $\text{Gal}(L_f/K)$ は W に作用し、根の置換を引き起こす。したがって W の自己同型写像の群、つまり W の置換群を \mathfrak{S}_W とするとき $|W| = n$ から n 次対称群 \mathfrak{S}_n でもあり、

$$\begin{aligned} \text{Gal}(L_f/K) &\longrightarrow \mathfrak{S}_W (= \mathfrak{S}_n) \\ \sigma &\longmapsto \sigma|_W \end{aligned}$$

という単射群準同型が存在する。 $(\mathfrak{S}_W$ に $\text{Gal}(L_f/K)$ は埋め込める)

とくに $|\text{Gal}(L_f/K)| = [L_f : K] \leq n!$ である。

Proof. $\forall \sigma \in \text{Gal}(L_f/K) = \text{Aut}_K(L_f)$ は $f(\sigma(x)) = \sigma(f(x)) = 0$ より $\sigma(x) \in W$ だから $\sigma(W) \subset W$ なので

$$\begin{aligned} \sigma|_W : W &\longrightarrow W \\ x &\longmapsto \sigma(x) \end{aligned}$$

となり σ は体の準同型より単射であって $|W| = n$ で有限集合なのでこれは全単射である。したがって $\sigma|_W$ は W 上の全単射写像の群である \mathfrak{S}_W の元となる。 $\sigma = \tau \in \text{Gal}(L_f/K)$ のとき、 $\sigma|_W = \tau|_W$ であるので $\text{Gal}(L_f/K) \longrightarrow \mathfrak{S}_W, \sigma \longmapsto \sigma|_W$ は写像になっている。また、 $\sigma|_W = \tau|_W$ のとき、 $\text{Aut}_K(L_f)$ の元としての σ, τ は K を動かさないのでも最小分解体の定義から $L_f = K(W)$ なので W の動かし方で定まるから $\sigma = \tau$ である。したがって制限写像 $\text{Gal}(L_f/K) \longrightarrow \mathfrak{S}_W$ は単射である。

L_f/K は定義 (12.2) から有限次 Galois なので命題 (12.1) の (1) \Leftrightarrow (4) から $[L_f : K] = h_{L_f}(L_f) = |\text{Aut}_K(L_f)| = |\text{Gal}(L_f/K)|$ である。ここで上述のことから $\text{Gal}(L_f/K)$ は $\mathfrak{S}_W = \mathfrak{S}_n$ に埋め込めるから $|\text{Gal}(L_f/K)| = [L_f : K] \leq |\mathfrak{S}_n| = n!$ より示された。 \square

系 12.4. 一般の n 次多項式 $f \in K[X]$ の最小分解体 L の拡大次数は $n!$ 以下である。

Proof. 命題 (12.3) で f は分離多項式とは限らないので $|W| \leq n$ であるから $|\mathfrak{S}_W| \leq |\mathfrak{S}_n|$ である。埋め込むことは同様にできるから $\text{Gal}(L_f/K)$ を $\text{Aut}_K(L)$ として $|\text{Aut}_K(L)| \leq |\mathfrak{S}_W| \leq |\mathfrak{S}_n| = n!$ より成立。 \square

命題 12.5. 分離多項式 $f \in K[X] - K$ の根の集合 W とその元 $x, y \in W$ に対して以下は同値。

(1) x と y は K 上共役。

(2) x と y は同じ $\text{Gal}(L_f/K)$ –軌道上に属する。

(3) x と y は f の同じ既約成分の根。

とくに f が既約であるためには $W \neq \emptyset$ かつ $\text{Gal}(L_f/K)$ が W に推移的に作用することが必要十分である。(群 G が集合 X に推移的に作用するとは G –軌道 $G(x) := \{\sigma(x) | \sigma \in G\}$ とするとき $G(x) = X$ となること)

Proof. Ω を K の代数閉包とする。

(1) \Leftrightarrow (2)

f が分離的なので L_f/K は有限次 Galois 拡大であるから正規なので $\sigma \in \text{Aut}_K(\Omega), \sigma(L_f) = L_f$ を満たすから $\sigma|_{L_f} \in \text{Aut}_K(L_f) = \text{Gal}(L_f/K)$ となる。また、 $\sigma \in \text{Gal}(L_f/K)$ は系 (??) より $\tilde{\sigma} \in \text{Aut}_K(\Omega)$ に拡張できる。これより

$$\begin{aligned} x \text{ と } y \text{ が } K \text{ 上共役} &\Leftrightarrow \exists \sigma \in \text{Aut}_K(\Omega), x = \sigma(y) \\ &\Leftrightarrow y \in \{\sigma(x) | \sigma \in \text{Gal}(L_f/K)\} \\ &\Leftrightarrow y \text{ は } x \text{ の } \text{Gal}(L_f/K) \text{–軌道に含まれる} \end{aligned}$$

となる。

(1) \Leftrightarrow (3)

命題 (??) の (1) \Leftrightarrow (3) より x と y が K 上共役 $\Leftrightarrow x$ と y の K 上の最小多項式は同じなのでその最小多項式を $g \in K[X] - K$ とすれば g は f の既約成分であるので示された。

もし $\text{Gal}(L_f/K)$ が $W (\neq \emptyset)$ に推移的に作用するとなると、ある f の根 x に対してその $\text{Gal}(L_f/K)$ –軌道は W に一致するので任意の f の根は (2) \Leftrightarrow (3) から f の同じ既約成分の根になる。したがって f の根はすべて f の既約成分の根になるから f は既約。 f が既約であるとき (2) \Leftrightarrow (3) からすべての根はある f の根 x と同じ $\text{Gal}(L_f/K)$ –軌道上に属するから $W \subset \text{Gal}(L_f/K)$ –軌道である。また、 x の軌道はすべて f の根になるから $W \supset \text{Gal}(L_f/K)$ –軌道より $W = \text{Gal}(L_f/K)$ –軌道となり推移的である。 \square

例 12.6. K : 体、 $L := K(T_1, \dots, T_n)$: n 変数の有理関数体とする。 $G := \mathfrak{S}_n$ として T_i の添字の置換とする。つまり、 $\sigma \in G$ と $f = f(T_1, \dots, T_n) \in L$ に対して、 $\sigma f := f(T_{\sigma(1)}, \dots, T_{\sigma(n)})$ と作用させることとする。このとき、 G の元は T_i を写し、 K の元は動かさないので L の体の自己同型とみなせるので $G \subset \text{Aut}_{\text{体}}(L)$ となる。

$M := L^G$ とおくとこれは T_1, \dots, T_n の対称有理式の集合になる。このとき L/M が Galois となって、 $G = \text{Gal}(L/M)$ を満たす。とくに $[L : M] = n!$ となる。

Proof. $s_i := (T_1, \dots, T_n \text{ の } i \text{ 次基本対称式})$ とすると $s_i \in L$ である。つまり、 $s_1 = T_1 + \dots + T_n, s_2 = T_1 T_2 + T_1 T_3 + \dots + T_{n-1} T_n, \dots, s_n = T_1 \dots T_n$ となっている。 $M_0 := K(s_1, \dots, s_n)$ とおくと基本対称式は文字を置換しても同じままなので M_0 は G で固定される。よって $M_0 \subset M$ である。

ここで T_1, \dots, T_n は解と係数の関係から $X^n - s_1 X^{n-1} + \dots + (-1)^n s_n \in M_0[X]$ の根になる。 T_1, \dots, T_n はそれぞれ異なるから命題 (??) からこの多項式は分離的である。 L はこの多項式の最小分解体なので定義 (12.2) から L/M_0 は有限次 Galois 拡大になる。命題 (12.3) から $[L : M_0] \leq n!$ である。また、 L/M は Artin の定理 (??) から Galois 拡大で $G = \mathfrak{S}_n = \text{Aut}_M(L)$ であり、Rem (??) から $[L : M] = |\text{Aut}_M(L)| = |\mathfrak{S}_n| = n!$ となる。よって $M_0 \subset M$ と $[L : M_0] \leq n! = [L : M]$ より $M_0 = M$ となる。以上より M は T_1, \dots, T_n の対称有理式の集合になり、 $G = \mathfrak{S}_n = \text{Gal}(L/M)$ で、 $[L : M] = n!$ となる。 \square

Fact 12.7. $n \geq 5$ ならば n 次交代群 \mathfrak{A}_n は非アーベル単純群なので非自明な正規部分群を持たない。命題 (??) より可解群となるための可解列に出てくる交換子群は正規部分群であるので \mathfrak{A}_n は可解群にならない。よって \mathfrak{A}_n を含む \mathfrak{S}_n は $n \geq 5$ で非可解群。任意の n 次分離多項式 ($\in \mathbb{Q}[X]$) の Galois 群は命題 (12.3) より \mathfrak{S}_n の部分群に同型である。これより定理 ?? から 5 次以上の一般代数方程式は解の公式を持たないことがわかる。

12.3 IGP (Inverse Galois Problem)

Galois の逆問題 (IGP Inverse Galois Problem) とは K : 体、 G : 有限群が与えられたとき、 $\text{Gal}(L/K) \cong G$ となる Galois 拡大 L/K は作れるかというもの

Fact 12.8. Hilbert の既約性定理

$X^n - s_1 X^{n-1} + \cdots + (-1)^n s_n$ はほとんどの (有限個の例外を除き) $(s_1, \dots, s_n) \in \mathbb{Q}^n$ に対し既約でその Galois 群は \mathfrak{S}_n と同型。

12.4 無限次 Galois 拡大

L/K が無限次 (かもしれない) Galois 拡大のとき $\text{Gal}(L/K)$ は profinite (副有限、射影有限) 群 (有限群の射影極限になっている群) である。つまり、 $L'/K, L''/K (L' \subset L'')$ を L に含まれる任意の有限次 Galois 拡大とし、制限写像 $\text{Gal}(L''/K) \rightarrow \text{Gal}(L'/K), \sigma \mapsto \sigma|_{L'}$ による射影極限

$$\text{Gal}(L/K) = \varprojlim_{L'/K} \text{Gal}(L'/K) \subset \prod_{L'/K} \text{Gal}(L'/K)$$

で定義される。 $\text{Gal}(L'/K)$ は離散位相によって位相群になるので $\text{Gal}(L/K)$ にはその直積位相が入り、これを Krull 位相という。

定理 12.9. Galois 理論の基本定理の無限次版

L/K : Galois 拡大、 $G := \text{Gal}(L/K)$ とすると次の一対一対応がある。

$$\{L/K \text{ の部分体} \} \xleftrightarrow{1:1} \{G \text{ の閉部分群} \}$$

$$M \mapsto \text{Aut}_M(L) = \text{Gal}(L/M)$$

$$L^H \longleftarrow H$$

$$\{L/K \text{ の部分体で } K \text{ 上有限次のもの} \} \xleftrightarrow{1:1} \{G \text{ の開部分群 (指数有限の部分群)} \}$$

$$\{L/K \text{ の部分体で } K \text{ 上有限次のものでかつ } K \text{ 上 Galois になるもの} \} \xleftrightarrow{1:1} \{G \text{ の開正規部分群} \}$$

他の性質は有限次のとき (??) と同じ。

定義 12.10. K : 体、 K^{sep} : K の分離閉包とすると、命題 (??) から K の代数閉包の相対的分離閉包が K^{sep} になるから $\forall x \in K^{\text{sep}}$ は K 上代数的かつ分離的なので K^{sep}/K は Galois であり、 $G_K := \text{Gal}(K^{\text{sep}}/K)$ を K の絶対 Galois 群という。

すると、 L'/K を K^{sep}/K に含まれる有限次 Galois 拡大とすると $G_K = \varprojlim_{L'/K} \text{Gal}(L'/K)$ となり、とく

に $\forall L'/K$ に対し $G_K \xrightarrow{sur} \text{Gal}(L'/K)$ があるから $\forall L'/K$ に G_K が作用していると考えられる。

逆に G_K から K を作ることも考えられる。

定理 12.11. Neukirch – 内田 (–Pop) の定理

K_1, K_2 : 素体上有限生成な体。

$$G_{K_1} \cong G_{K_2} \Rightarrow K_1 \cong K_2$$

(位相群として同型) (体として同型)

が成り立つ。これの一般化である Grothendieck 予想もある。

12.5 いろいろな Galois 拡大 (Abel 拡大)

12.5.1 有限体

以下では K : 有限体、 $\text{char}(K) = p > 0$ で $[K : \mathbb{F}_p] = f, |K| = p^f = q$ とする。

補題 12.12. 体 F の乗法群 F^\times の有限部分群は巡回群。

Proof. G を F^\times の有限部分群、 N を G の冪数とする。ただし、冪数とは G の元の位数の最小公倍数のことである。このとき正整数 $n_1 | n_2 | \cdots | n_r$ によって $G \cong \mathbb{Z}/n_1\mathbb{Z} \oplus \cdots \mathbb{Z}/n_r\mathbb{Z}$ で $N = \text{LCM}(n_1, \dots, n_r) = n_r$ となる。このとき $\forall x \in G, x^N = 1$ より G の元は $X^N - 1$ の根であり、この多項式は F に高々 N 個しか根を持たないので $|G| \leq N$ となる。そして、 $|\mathbb{Z}/n_r\mathbb{Z}| = n_r = N$ より $G = \mathbb{Z}/n_r\mathbb{Z}$ となるしかなく、したがって G は巡回群になる。 \square

系 12.13. K が q 元体ならば $K^\times \cong \mathbb{Z}/(q-1)\mathbb{Z}$ で位数 $q-1$ の巡回群となる。

Proof. K^\times は 0 を除いた $q-1$ 個の元の有限群なので成立。 \square

系 12.14. 位数 q の有限体 K は同型を除き一意に定まる。これを \mathbb{F}_q と書く。

Proof. 有限体 K は素体として \mathbb{F}_p と同型な体を含む。 Ω を \mathbb{F}_p の代数閉包とすると K/\mathbb{F}_p が有限次拡大より代数拡大なので定理 (??) から Ω に K を埋め込める。 K の元は系 (12.13) より $X^{q-1} - 1$ の根と 0 ですべて出しつくされるので $K = \{x \in \Omega | x^q = x\}$ と書ける。 Ω に埋め込めばすべてこの形に書けるので同型を除き一意に定まる。 \square

系 12.15. 各 $n \in \mathbb{Z}^+$ に対し \mathbb{F}_q の n 次拡大は同型を除きただ一つ存在しそれは \mathbb{F}_{q^n} である。とくに \mathbb{F}_p の代数閉包 Ω の中では唯一つである。

Proof. \mathbb{F}_q の n 次拡大は \mathbb{F}_p の q^n 次拡大なので系 (12.14) を q^n について適用すれば良い。 Ω の中では $\mathbb{F}_{q^n} = \{x \in \Omega | x^{q^n} = x\}$ として書けるので唯一つに定まる。 \square

命題 12.16. $\mathbb{F}_{q^n} / \mathbb{F}_q$ は Galois 拡大であり

$$\begin{aligned} \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} &\longrightarrow \text{Gal}(\mathbb{F}_{q^n} / \mathbb{F}_q) \\ 1 &\longmapsto \phi_q \end{aligned}$$

で定める準同型写像は同型写像になる。ただし、 ϕ_q は

$$\begin{aligned}\phi_q : \mathbb{F}_{q^n} &\longrightarrow \mathbb{F}_{q^n} \\ x &\longmapsto x^q\end{aligned}$$

とする。

Proof. \mathbb{F}_q の任意の n 次拡大体 L は系 (12.16) より $L \cong \mathbb{F}_{q^n}$ となるので $L = \mathbb{F}_{q^n}$ とする。定義から $\phi_q \in \text{Aut}(\mathbb{F}_{q^n})$ である。 $\forall x \in \mathbb{F}_q$ に対しては $\mathbb{F}_q = \{x \in \Omega \mid x^q = x\}$ より $\phi_q(x) = x^q = x$ なので \mathbb{F}_q 上恒等的だから $\phi_q \in \text{Aut}_{\mathbb{F}_q}(\mathbb{F}_{q^n})$ となる。

また、 ϕ_q は位数 n になることを示す。つまり、 ϕ_q^i が $i = 1, \dots, n-1$ で $\phi_q^i \neq \text{Id}$ となり、 $i = n$ で $\phi_q^i = \text{Id}$ となればよい。 $\phi_q^i : x \mapsto \phi_q^i(x) = x^{q^i}$ であるからもしこれが恒等であるとする $\forall x \in \mathbb{F}_{q^n}, x^{q^i} = x$ であるので \mathbb{F}_{q^n} は系 (12.16) の証明における $\{x \in \Omega \mid x^{q^i} = x\} = \mathbb{F}_{q^i}$ の部分集合になるから元の個数を考えれば $i = n$ でそのようになることがわかる。したがって ϕ_q は位数 n である。

$G := \langle \phi_q \rangle \subset \text{Aut}(\mathbb{F}_{q^n})$ とする。 ϕ_q の位数が n より $\langle \phi_q \rangle \cong \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ となる。 L/L^G は Artin の定理 (??) より Galois 拡大で $[L : L^G] = |G| = n$ となる。また、 $L = \mathbb{F}_{q^n}$ より $[L : \mathbb{F}_q] = n$ なので $[L : \mathbb{F}_q] = [L : L^G]$ と $\mathbb{F}_q, L^G \subset L$ より $\mathbb{F}_q = L^G$ となるから $\mathbb{F}_{q^n}/\mathbb{F}_q$ は Galois 拡大でその Galois 群は $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ と同型。 \square

系 12.17. \mathbb{F}_q の代数閉包を $\overline{\mathbb{F}_q}$ とすると \mathbb{F}_q の絶対 Galois 群 $G_{\mathbb{F}_q} := \text{Gal}(\overline{\mathbb{F}_q}/\mathbb{F}_q)$ であり、このとき $G_{\mathbb{F}_q} \cong \hat{\mathbb{Z}} := \varprojlim_n \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ となる。また、 $\mathbb{Z}_l := \varprojlim_m \mathbb{Z}/l^m\mathbb{Z}$ とするとき $\hat{\mathbb{Z}}$ は $\prod_{l:\text{素数}} \mathbb{Z}_l$ と書ける。

例 12.18. 形式的冪級数体 $K := \mathbb{C}((X))$ の絶対 Galois 群は $G_K \cong \hat{\mathbb{Z}}$ である。