

補足と演習問題 (12/22 配布)

問 1. (可換環論の復習) 可換環  $R$  の積閉集合  $S$  に関する分数化  $S^{-1}R$  の構成:

- (1)  $S$  を積閉集合 ( $a, b \in S \implies ab \in S$ ) で、 $1 \in S$  かつ  $0 \notin S$  とする。このとき、 $R \times S$  上に次で定める関係は同値関係である:

$$(a_1, b_1) \sim (a_2, b_2) \iff \exists u \in S : u(a_1b_2 - a_2b_1) = 0.$$

以下、 $(a, b)$  の同値類を  $a/b$  と書く。

- (2)  $S^{-1}R := (R \times S)/\sim$  上に次で加法・乗法を定めると、可換環を成す:

$$a_1/b_1 + a_2/b_2 := (a_1b_2 + a_2b_1)/(b_1b_2), \quad a_1/b_1 \cdot a_2/b_2 := (a_1a_2)/(b_1b_2).$$

- (3)  $\iota: R \rightarrow S^{-1}R; a \mapsto a/1$  は環準同型。 $S$  が零因子を含まないならば、 $\iota$ : 単射。  
 (4) 組  $(S^{-1}R, \iota)$  は次の普遍性で特徴付けられる: 可換環  $T$  と環準同型  $f: R \rightarrow T$  との組  $(T, f)$  が  $f(S) \in T^\times$  を満たすならば、環準同型  $\tilde{f}: S^{-1}R \rightarrow T$  で  $f \circ \iota = \tilde{f}$  となるものが一意に存在する。  
 (5)  $R$  が整域のときは、上の同値関係  $\sim$  の定義は (講義で扱ったように) もう少し簡明になり、 $\iota: R \rightarrow S^{-1}R$  は単射。更に、 $S = R \setminus \{0\}$  のとき、 $S^{-1}R$  は体。 $(R$  の商体 (quotient field) という。)

問 2. (可換環論の復習) 可換環  $R$  の ideal  $\mathfrak{a}$  に関する剰余環  $R/\mathfrak{a}$  の構成:

- (1)  $R$  上に次で定める関係は同値関係である:

$$a \sim b \iff a - b \in \mathfrak{a}.$$

(通常、 $a \equiv b \pmod{\mathfrak{a}}$  と書く。) 以下、 $a$  の同値類を  $\bar{a}$  と書く。

- (2)  $R/\mathfrak{a} := R/\sim$  上に次で加法・乗法を定めると、可換環を成す:

$$\bar{a} + \bar{b} := \overline{a + b}, \quad \bar{a} \cdot \bar{b} := \overline{a \cdot b}.$$

- (3)  $\pi: R \rightarrow R/\mathfrak{a}; a \mapsto \bar{a}$  は全射環準同型。

- (4)  $\mathfrak{p}$ : 素 ideal  $\iff R/\mathfrak{p}$ : 整域

- (5)  $\mathfrak{m}$ : 極大 ideal  $\iff R/\mathfrak{m}$ : 体

問 3. (可換環論の復習) 一般に整域  $R$  に対して、

- (1)  $R$ : Euclid 整域  $\implies R$ : 単項 ideal 整域 (PID)  $\implies R$ : 一意分解整域 (UFD)  
 (2)  $R$ : UFD のとき、 $f \in R \setminus \{0\}$  に対し、 $f$ : 既約元  $\iff f$ : 素元  $\iff (f)$ : 素 ideal  
 (3)  $R$ : PID のとき、 $\mathfrak{p}$ : 素 ideal で  $\mathfrak{p} \neq \{0\} \iff \mathfrak{p}$ : 極大 ideal

問 4. 体  $K$  上の一変数多項式環  $R := K[X]$  において、

- (1)  $R$  は次数関数  $\deg: R \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{N}$  に関して Euclid 整域である。  
 (2) 従って前問より、 $f \in K[X] \setminus \{0\}$  に対して、 $f$ : 既約  $\iff f$ : 素元  $\iff (f)$ : 素 ideal  $\iff (f)$ : 極大 ideal  $\iff K[X]/(f)$ : 体  
 (3) 合成写像  $K \hookrightarrow K[X] \rightarrow K[X]/(f)$  は単射環準同型。従って、 $K[X]/(f)$  は  $K$  を含む体 ( $K$  の拡大体) と看做せる。

問 5. 体の有限次拡大  $L \supset M \supset K$  に於ける拡大次数の連鎖律  $[L:K] = [L:M][M:K]$  を示せ。(具体的には、 $(x_1, \dots, x_n)$  が  $L$  の  $M$  上の基底、 $(y_1, \dots, y_m)$  が  $M$  の  $K$  上の基底であるとき、 $(x_i y_j)_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m}$  が  $L$  の  $K$  上の基底であることを示せばよい。)

問 6.  $K$  を体とし、その代数閉包  $\bar{K}$  を 1 つ取って固定する。 $f(X) \in K[X]$  を  $K$  上の既約多項式とし、その一つの根を  $\alpha \in \bar{K}$  とする。

- (1) (準備) 体上有限次元な整域は体である。  
 (2)  $K$  上の環準同型  $\varphi: K[X] \rightarrow \bar{K}; X \mapsto \alpha$  について、 $\text{Im} \varphi = K(\alpha)$  である。  
 (3)  $\text{Ker} \varphi = (f)$  である。これより、 $K[X]/(f) \simeq K(\alpha)$  となる。  
 (4)  $\iota: K(\alpha) \hookrightarrow \bar{K}$  を  $K$  上の埋込とする。 $\iota(\alpha)$  も  $f$  の根である。  
 (5) 逆に  $f$  の根  $\beta \in \bar{K}$  に対し、 $\iota(\alpha) = \beta$  となる  $K$  上の埋込  $\iota: K(\alpha) \hookrightarrow \bar{K}$  が一意に存在する。  
 (6) 以上により、 $K(\alpha)$  の  $\bar{K}$  への  $K$  の埋込全体と、 $f$  の根全体とは、一対一に対応する。

問7.  $f(X) \in K[X]$  を  $K$  上の  $n$  次 monic 多項式とし、その根を (重複度を込めて)  $w_1, \dots, w_n$  とする。根の差積の平方

$$D(f) := \prod_{1 \leq i < j \leq n} (w_i - w_j)^2$$

を  $f$  の判別式 (discriminant) という。

(1)  $f(X) = X^3 + pX + q$  の 3 根を  $x_1, x_2, x_3$  とする。 $x_1, x_2, x_3$  の基本対称式と  $p, q$  との関係を用いて、判別式  $D(f) = \prod_{1 \leq i < j \leq 3} (x_i - x_j)^2 = (x_1 - x_2)^2(x_1 - x_3)^2(x_2 - x_3)^2$

を  $p, q$  で表せ。

(2)  $f$  の微分  $f'$  の根を  $v_1, \dots, v_{n-1}$  (重根は重複度込みで考える) とするとき、

$$D(f) = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} \prod_{i=1}^n f'(w_i) = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} \prod_{j=1}^{n-1} f(v_j).$$

(3)  $f(X) = X^n - aX - b$  について判別式  $D(f)$  を求めよ。(ヒント:  $f, f'$  について互除法を用いて計算せよ。)

問8.  $f(X) = X^4 + pX^2 + qX + r$  の 4 根を  $x_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) とする。

(1)  $x_i$  の基本対称式と  $p, q, r$  との関係は?

(2)  $x_1x_2 + x_3x_4, x_1x_3 + x_2x_4, x_1x_4 + x_2x_3$  を 3 根とする 3 次多項式を求めよ (係数を  $p, q, r$  で表せ)。

(3)  $(x_1 + x_2)(x_3 + x_4), (x_1 + x_3)(x_2 + x_4), (x_1 + x_4)(x_2 + x_3)$  を 3 根とする 3 次多項式を求めよ (係数を  $p, q, r$  で表せ)。

問9.  $K$  を標数  $p > 0$  の体とするとき、 $a, b \in K$  に対し、 $(a+b)^p = a^p + b^p, (ab)^p = a^p b^p$  となることを示せ。(ヒント: 二項展開して、素数  $p$  と  $1 \leq k \leq p-1$  とに対し  $p \mid \binom{p}{k}$

となることを用いる。) 即ち、 $\varphi: K \rightarrow K; a \mapsto a^p$  (中への) 体同型。特に、 $K$  が有限体ならば、 $\varphi$  は  $K$  の体自己同型。

問10. 素数  $p$  と自然数  $r$  との組  $(p, r)$  で  $q := p^r \leq 10$  なるもの  $(p, r) = (2, 2), (2, 3), (3, 2)$  (即ち  $q = 4, 8, 9$ ) に対し、

(1) 素体  $F_p = \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$  上  $r$  次の既約多項式  $f(X) \in F_p[X]$  を、とにかく見付けよ。

(2)  $f(X)$  が  $F_p$  上既約であることを、とにかく示せ。

(3)  $K := F_p[X]/(f)$  により  $q$  元体  $K$  を構成し、その乗積表を書け。

(4) Frobenius 同型  $\varphi: K \rightarrow K; a \mapsto a^p$  の関数表 ( $a$  と  $\varphi(a)$  との対応表) を作れ。

(5)  $\varphi^n = \text{id}_K$  となる最小の正整数  $n$  は何か。

問11. 体  $K$  の乗法群  $K^\times$  の有限部分群  $G$  は巡回群。(ヒント: 有限アーベル群の構造定理と、体では  $x^n = 1$  となる  $x$  が高々  $n$  個であることを用いよ。) 特に、 $K = F_q$ : 有限体に対し、 $F_q^\times$  は巡回群。

問12. 前問により、素数  $p$  に対し、 $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^\times$  は巡回群である。その生成元を、法  $p$  に関する原始根 (primitive root) という。幾つかの素数  $p$  に対し、原始根をとにかく求めよ。

問13. (Fermat の小定理)  $p$  を素数とするとき、 $a \in \mathbb{Z}$  に対し  $a^p \equiv a \pmod{p}$  となる。これを二通りで証明しよう。

(1) (乗法的)  $a \not\equiv 0 \pmod{p}$  ならば  $a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$  であることを示すことにより証明せよ。

(2) (加法的) 二項係数の性質から  $(a+b)^p \equiv a^p + b^p \pmod{p}$  を導き、 $a$  に関する帰納法を用いて証明せよ。(Fermat による原証明はこちらだったと言われている。)

問14. 次の体拡大  $L/K$  が Galois 拡大でないことを簡潔に説明せよ。また、 $L$  を含む拡大体  $\tilde{L}$  で、 $\tilde{L}/K$  が Galois 拡大となるようなものが存在するか。存在するならその最小なもの ( $L/K$  の Galois 閉包という) は何か。

(1)  $L = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}), K = \mathbb{Q}$

(2)  $L = F_p(T), K = F_p(T^p)$  (ここに、 $T$  は  $F_p$  上超越的)

問 15.  $Z$  上の monic な多項式  $f(X) = \sum_{i=0}^n a_i X^i \in Z[X]$  ( $a_n = 1$ ) に対し、

- (1) ( Gauss の補題 )  $f$  が  $Q$  上可約ならば、 $Z$  上でも可約である。従って ( 対偶を取ると )  $f$  が  $Z$  上既約ならば、 $Q$  上でも既約である。
- (2) 特に、 $f$  が有理数の根  $x \in Q$  を持つならば、 $x \in Z$  かつ  $x|a_0$  である。

問 16. 上問を用いて、次の多項式が  $Z$  上 ( 従って  $Q$  上 ) 既約であることを示せ。

- (1)  $f(X) = X^3 + 2X - 1$
- (2)  $f(X) = X^3 + X - 6$
- (3)  $f(X) = X^4 - 10X^2 + 1$  ( ヒント : まづ 1 次因子を持たないこと、次に 2 次式 2 つの積にならないことを確かめよ。 )

問 17. 素数  $p$  に対し、自然な射影  $Z \rightarrow Z/pZ = F_p$  から定まる環準同型  $Z[X] \rightarrow F_p[X]$  による  $f(X) \in Z[X]$  の像を  $\bar{f}(X) \in F_p[x]$  と書くことにする。 $f(X) \in Z[X]$  に対し、或る素数  $p$  について  $\bar{f}(X) \in F_p[x]$  が既約なら、 $f$  は  $Z$  上 ( 従って  $Q$  上 ) 既約。

問 18. 次の多項式  $f(X) \in Z[X]$  の既約性を、幾つかの素数  $p$  に対する  $\text{mod } p$  での分解 ( $\bar{f}(X) \in F_p[x]$  の分解) を考えることにより、判定せよ。

- (1)  $f(X) = X^3 + 3X + 9$
- (2)  $f(X) = X^3 + 2X + 8$
- (3)  $f(X) = X^4 + 5X^2 + 2X + 15$

問 19. 第 8 円分多項式  $\Phi_8(X) \in Z[X]$  について、

- (1)  $\Phi_8(X)$  を求め、その  $Z$  上での既約性を直接判定せよ。
- (2)  $\Phi_8(X)$  が  $\text{mod } p$  で 1 次式の積に分解するような素数  $p$  の条件を決定せよ。( ヒント :  $F_p^\times$  内に 1 の原始 8 乗根が存在する条件は ? )
- (3) 任意の素数  $p$  に対し、 $\Phi_8(X)$  は  $\text{mod } p$  で可約 ( 若干の初等整数論の知識が要る )。

問 20.  $K$  を体、 $n$  を 1 以上の自然数とする。

- (1)  $K$  の代数閉包  $\bar{K}$  内に 1 の原始  $n$  乗根が存在するための必要十分条件は、「 $\text{ch}K = 0$  または ( $p := \text{ch}K > 0$  かつ  $p \nmid n$ )」である。
- (2) 上の条件を満たすとき、 $\bar{K}$  内の 1 の原始  $n$  乗根の一つを  $\zeta_n$  とする ( 一つ取って固定 )。  $K(\zeta_n)$  は  $K$  上 Galois 拡大。
- (3)  $G := \text{Gal}(K(\zeta_n)/K)$  とする。  $\sigma \in G$  に対し、  $\sigma(\zeta_n) = \zeta_n^a$  となる  $a$  を取ることににより、  $G \hookrightarrow (Z/nZ)^\times$  が定まる。これは  $\zeta_n$  の選び方に依らない。

問 21.  $p$  を奇素数、 $\zeta_p$  を 1 の原始  $p$  乗根の一つとし、 $K := Q(\zeta_p)$  とおく。

- (1) 第  $p$  円分多項式  $\Phi_p(X) \in Z[X]$  を求めよ。
- (2)  $g(Y) := \Phi_p(Y+1) \in Z[X]$  とおくと、 $g$  は  $Z$  上 ( 従って  $Q$  上 ) 既約。( ヒント : Eisenstein の既約性判定法が使える。 )
- (3)  $\Phi_p : Z$  上 ( 従って  $Q$  上 ) 既約。( 従って、 $\Phi_p(X) = \text{Irr}(\zeta_p/Q)(X)$  である。 )
- (4)  $\prod_{\zeta \in \mu_p^*} (1 - \zeta) = p$  を示せ。また、判別式  $D(\Phi_p) = ?$
- (5) 前問の対応により  $\text{Gal}(K/Q) \simeq (Z/pZ)^\times$  で、 $\text{Gal}(K/Q)$  は  $(p-1)$  次巡回群。

問 22. 前問の状況で、 $G := \text{Gal}(K/Q)$  とおき、 $\bar{a} = a \text{ mod } p \in (Z/pZ)^\times$  に対し、 $\sigma_a \in G$  を  $\sigma_a(\zeta_p) = \zeta_p^{\bar{a}}$  で定める。

- (1)  $(p-1)$  次巡回群  $(Z/pZ)^\times$  の生成元 ( 法  $p$  に関する原始根 ) を一つ取って  $\bar{g} = g \text{ mod } p$  とする;  $(Z/pZ)^\times = \langle \bar{g} \rangle$ 。  $(Z/pZ)^\times$  の指数 2 の部分群  $H$  を  $\bar{g}$  で表せ。  
( $(p-1)/2-1$ )
- (2)  $\xi_i := \sum_{j=0}^{p-2} \zeta_p^{g^{2j+i}}$  ( $i = 0, 1$ ) とする。  $\xi_i \in K^H$  を示し、 $\sigma_g(\xi_0), \sigma_g(\xi_1)$  を求めよ。
- (3)  $\xi_0 + \xi_1, \xi_0 \xi_1 \in K^G = Q$  を示し、その値を求めよ。
- (4)  $\xi_0 - \xi_1 = \sum_{i=0}^{p-2} (-1)^i \zeta_p^{g^i}$  は Gauss 和 ( 次問参照 ) である。  $(\xi_0 - \xi_1)^2 = ?$
- (5)  $Q$  の 2 次拡大  $K^H$  を求めよ。

問 23.  $p$  を奇素数、 $\left(\frac{\cdot}{p}\right)$  を平方剰余記号 (Lagrange 記号)、 $\zeta_p$  を 1 の原始  $p$  乗根 (一つ取って固定) とする。  $G(p) := \sum_{a=1}^{p-1} \left(\frac{a}{p}\right) \zeta_p^a$  を Gauss 和 (Gaussian sum) とする。

(1)  $(k, p) = 1$  のとき、  $\sum_{a=1}^{p-1} \left(\frac{a}{p}\right) (\zeta_p^k)^a = \left(\frac{k}{p}\right) G(p)$

(2)  $G(p)^2 = \left(\frac{-1}{p}\right) p (=: p^*)$

(3)  $l$  : 奇素数に対し、平方剰余の相互律  $\left(\frac{l}{p}\right) = \left(\frac{p^*}{l}\right)$  を示せ。

(4)  $\zeta_p = \exp\left(\frac{2\pi i}{p}\right) \in \mathbb{C}$  に取るとき、 $G(p)$  の符号 (偏角) を決定せよ。

問 24.  $p$  を奇素数、 $\zeta_p$  を 1 の原始  $p$  乗根の一つとし、 $K := \mathbb{Q}(\zeta_p)$  とおく。 $p-1$  の各約数  $d$  に対し、 $K/\mathbb{Q}$  の  $d$  次中間体が唯一つ存在する。その典型的な生成元を見付けよ。

問 25.  $m, n$  を互いに素な自然数とする。

(1) (中国剰余定理) 自然に  $\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z} \simeq \mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  (環同型) また、これより  $(\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z})^\times \simeq (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times \times (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  (群同型)。

(2)  $\mathbb{Q}(\zeta_{mn}) = \mathbb{Q}(\zeta_m, \zeta_n)$  である。

(3) 上記 2 つを円分体の Galois 対応の下で結び付けよ。

(4)  $\mathbb{Q}(\zeta_m) \cap \mathbb{Q}(\zeta_n) = \mathbb{Q}$  である。

問 26. (例えば  $n = 5, 7, 8, 9, 12, 15$  など) 幾つかの  $n$  に対し、 $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$  の群構造を決定し、部分群を列挙すると共に、対応する  $\mathbb{Q}(\zeta_n)$  の部分体とその適切な生成元の最小多項式を求めよ。

問 27. 次の値を求めよ。

(1)  $\cos 20^\circ \cos 40^\circ \cos 80^\circ$

(2)  $\cos \frac{2\pi}{7} \cos \frac{4\pi}{7} \cos \frac{8\pi}{7}$

(特に、“綺麗な”値になる理由を Galois 理論から説明せよ。)

問 28. 次の  $\mathbb{Q}$  上の多項式  $f \in \mathbb{Q}[X]$  について、 $\mathbb{Q}$  上の最小分解体  $K := \text{Spl}(f/\mathbb{Q})$  を求めよ。(簡単な生成元 (複数可) を添加する形で表示せよ。) その  $\mathbb{Q}$  上の拡大次数  $[K : \mathbb{Q}]$  は? また、 $K/\mathbb{Q}$  上の Galois 群  $G = \text{Gal}(K/\mathbb{Q})$  の群構造を決定した上で、 $K/\mathbb{Q}$  の全ての部分体を、 $G$  の部分群との Galois 対応を明らかにして求めよ。

(1)  $f(X) = X^3 - 2$

(2)  $f(X) = X^5 - 2$

(3)  $f(X) = X^3 - 3X + 1$

(4)  $f(X) = X^4 - 10X^2 + 1$

(5)  $f(X) = X^4 - 20X^2 + 32$

(6)  $f(X) = X^4 - 10X^2 + 5$

問 29.  $f(X) \in \mathbb{Q}[X]$  を  $\mathbb{Q}$  上の既約 monic 多項式、 $\alpha$  をその根の一つとして、根体  $K := \mathbb{Q}(\alpha)$  を考える。 $K$  の元は或る  $g(X) \in \mathbb{Q}[X]$  を用いて  $g(\alpha)$  の形で表せるが、 $g(\alpha) \neq 0$  のとき、この逆元  $g(\alpha)^{-1} \in K$  を計算して具体的に表す方法を述べよ。(即ち、 $g(\alpha)^{-1} = h(\alpha)$  となる  $h(X) \in \mathbb{Q}[X]$  を計算する具体的な方法を与えよ。)

問 30.  $K = \mathbb{C}(t)$  を  $\mathbb{C}$  上の一変数有理関数体 ( $t$  は  $\mathbb{C}$  上超越的な元) とする。

(1)  $K$  の  $\mathbb{C}$  上の自己同型  $\sigma$  を  $\sigma(t) := \zeta_n t$  で定めると、 $\sigma$  は位数  $n$  で、 $G := \langle \sigma \rangle$  は位数  $n$  の巡回群。このとき  $K$  の  $G$  による固定体  $K^G$  は?

(2)  $K$  の  $\mathbb{C}$  上の自己同型  $\tau$  を  $\sigma(t) := \frac{1}{t}$  で定めると、 $\tau$  は位数 2 で、 $H := \langle \tau \rangle$  は位数 2 の巡回群。このとき  $K$  の  $H$  による固定体  $K^H$  は?