

今までの主なレポート課題の例 (01/14 配布)

問 15. D を平方数でない正整数とする。

- (1) 小さい D ($D = 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, \dots$) に対し、 \sqrt{D} の (正則) 連分数展開 (の循環節) を求めよ。
- (2) $D = n^2 + 1, n^2 + 2$ ($n \in \mathbf{N}$) の場合には規則性が見られる。それを観察して予想を立て (出来れば証明せよ)。
- (3) 他にも規則性が見られる場合があるか。観察・予想・証明せよ。

問 16. 前問の状況で、 \sqrt{D} の連分数展開を途中で打切って得られる分数 (\sqrt{D} の近似分数という) を p/q とする。

- (1) $\sqrt{D} \approx p/q$ であるので、 $p^2 - Dq^2$ は小さい整数になると考えられる。各 D に対し、幾つかの近似分数 p/q について $p^2 - Dq^2$ を計算せよ。何か規則性はないか。
- (2) 特に $p^2 - Dq^2 = \pm 1$ となる p, q を見付けることが出来るか。

問 17. n を正整数とし、不定方程式 $x^2 + y^2 = n$ を考える。

- (1) 小さい n に対し、整数解 (x, y) が存在するかどうか調べよ。存在する場合・しない場合にどのような規則性があるか。
- (2) 整数解 (x, y) が存在する場合に、それを利用して、 $x^2 + y^2 = n$ の有理数解を全て求めよ。

問 18. D を自然数で、平方数で割り切れないもの (square-free (平方無縁) という) とし、 $a + b\sqrt{-D}$ ($a, b \in \mathbf{Z}$) の形の複素数全体

$$\mathbf{Z}[\sqrt{-D}] := \{a + b\sqrt{-D} \mid a, b \in \mathbf{Z}\}$$

を考える。

- (1) $\mathbf{Z}[\sqrt{-D}]$ に属す数同士の和・差・積は再び $\mathbf{Z}[\sqrt{-D}]$ に属す (和・差・積で閉じている) ことを示せ。 ($\mathbf{Z}[\sqrt{-D}]$ が環 (ring) を成すという。)
- (2) $\alpha = a + b\sqrt{-D} \in \mathbf{Z}[\sqrt{-D}]$ に対し、その複素共役 $\bar{\alpha} := a - b\sqrt{-D}$ を考えると、

$$\overline{\alpha + \beta} = \overline{\alpha} + \overline{\beta}, \quad \overline{\alpha\beta} = \overline{\alpha}\overline{\beta}$$

が成り立つことを示せ。

- (3) $N(\alpha) := \alpha\bar{\alpha}$ (α のノルムという) と置くと、 $N(\alpha) \in \mathbf{Z}$ であり、 $N(\alpha\beta) = N(\alpha)N(\beta)$ が成り立つことを示せ。
- (4) $D \equiv 3 \pmod{4}$ の時は、実は、 $\sqrt{-D}$ の代わりに $\omega := \frac{-1 + \sqrt{-D}}{2}$ を考えて、 $\mathbf{Z}[\omega] := \{a + b\omega \mid a, b \in \mathbf{Z}\}$ を考えた方が良い。 ω を根とする整数係数の 2 次多項式 $f(X) \in \mathbf{Z}[X]$ を求めよ。また、 $\mathbf{Z}[\omega]$ が和・差・積で閉じていることを示せ。

問 19. $\mathbf{Z}[\sqrt{-D}]$ において、 \mathbf{Z} の時と同様に、 $\alpha = \beta\gamma$ となる $\gamma \in \mathbf{Z}[\sqrt{-D}]$ が存在するとき、 α が β で割り切れる (α が β の倍数、 β が α の約数) といい、 $\beta \mid \alpha$ と書く。

- (1) $a, b \in \mathbf{Z}$ に対して、 $\mathbf{Z}[\sqrt{-D}]$ での意味で $b \mid a$ であることと、 \mathbf{Z} での意味で $b \mid a$ であることは同値。
- (2) $\beta \mid \alpha$ ならば、 $N(\beta) \mid N(\alpha)$ 。
- (3) $\varepsilon \in \mathbf{Z}[\sqrt{-D}]$ に対し、 $\varepsilon \mid 1$ となることと $N(\varepsilon) = \pm 1$ となることは同値。(このような 1 の約数を単数という。約数・倍数を考えるときは単数倍の違いは区別できない (のではない)。)
- (4) $\mathbf{Z}[\sqrt{-D}]$ の単数は、 $D = 1$ のとき $\varepsilon = \pm 1, \pm\sqrt{-1}$ で、それ以外は $\varepsilon = \pm 1$ に限る。($D = 3$ のとき、 $\mathbf{Z}[\omega]$ で考えていれば、 $\varepsilon = \pm 1, \pm\omega, \pm\omega^2$ の可能性もある。)

問 20. D を square-free な正整数とし、 $a + b\sqrt{D}$ ($a, b \in \mathbf{Z}$) の形の実数全体

$$\mathbf{Z}[\sqrt{D}] := \{a + b\sqrt{D} \mid a, b \in \mathbf{Z}\}$$

について同様なことを考える。このとき一般に、 $\varepsilon \mid 1$ となる $\varepsilon \in \mathbf{Z}[\sqrt{D}]$ は無限個存在する (ので、数論がいろいろ難しくなる)。 $D = 2, 3, 5, 6, 7, \dots$ に対し、そのような ε を見出せ。 $D = 61, 199$ などではどうか。(見付けるのに \sqrt{D} の連分数展開が利用できる。)

問 21. $Z[\sqrt{-D}]$ において、素数・既約数を次で定義する。単数でも 0 でもない $\pi \in Z[\sqrt{-D}]$ について、

- π が $Z[\sqrt{-D}]$ の既約数 $\iff (\pi = \alpha\beta \implies (\pi|\alpha \text{ または } \pi|\beta))$
- π が $Z[\sqrt{-D}]$ の素数 $\iff (\pi|\alpha\beta \implies (\pi|\alpha \text{ または } \pi|\beta))$

(π は p に対応するギリシャ文字だから使ったが、勿論ここでは円周率ではない。)

- (1) 素数は既約数でもある。
- (2) $Z[\sqrt{-D}]$ に属す数は、単数でも 0 でもなければ、既約数の積に分解できる。(ヒント: $N(\alpha)$ に関する帰納法)
- (3) $Z[\sqrt{-D}]$ に属す数が素数の積に分解できるならば、その分解は掛ける順番と各素因数の単数倍の違いを除いて一意的である。(ヒント: 上の定義にある素数の性質があれば、 Z での時と全く同様に証明できる。)
- (4) $D = 5$ のとき、 $Z[\sqrt{-5}]$ 内で、6 は $6 = 2 \cdot 3 = (1 + \sqrt{-5})(1 - \sqrt{-5})$ と分解される。この時、各因数 $2, 3, 1 \pm \sqrt{-5}$ は $Z[\sqrt{-5}]$ の既約数であり、どれも互いに単数倍ではない。従って、既約数への分解の一意性は成立しない。
- (5) $Z[\sqrt{-5}]$ 内で、他に既約数の積に 2 通りに分解される例を見付けよ。($Z[\sqrt{-6}]$ などでも同様の現象が起きるので、そこでの例でも可。)

問 22. 特に $Z[\sqrt{-1}]$ を Gauss の整数環という。 $Z[\sqrt{-1}]$ では Z と類似の互除法が出来ることから、素因数分解の一意可能性が成立する。これを以下の順を追って示そう。

- (1) $\xi \in C$ に対し、 $N(\xi - \gamma) < 1$ となる $\gamma \in Z[\sqrt{-1}]$ が存在することを示せ。(ヒント: $\xi = x + y\sqrt{-1} \in C$ を平面の点 (x, y) に対応させるとき(複素数平面・Gauss 平面などという)、 $N(\xi) = x^2 + y^2$ は原点から (x, y) までの距離の平方である。)
- (2) 任意の $\alpha, \beta \in Z[\sqrt{-1}], \beta \neq 0$ に対して、 $\alpha = \beta\gamma + \delta, N(\delta) < N(\beta)$ となる γ, δ が存在することを示せ。(ヒント: $\xi = \alpha/\beta$ について前問を適用せよ。これさえあれば以下の議論は Z の場合と殆ど同様に出来る。)
- (3) 任意の $\alpha, \beta \in Z[\sqrt{-1}]$ に対して、次を満たす $\delta \in Z[\sqrt{-1}]$ が存在することを示せ。
 - $\delta|\alpha, \delta|\beta$
 - $\delta'|\alpha, \delta'|\beta \implies \delta'|\delta$
 このような δ は単数倍の違いを除いて一意的である。(その違いを気にせずに) $\delta = \gcd(\alpha, \beta)$ と書いて、 α, β の最大公約数と呼ぶ。
- (4) このとき、 $\alpha\xi + \beta\eta = \delta$ となる $\xi, \eta \in Z[\sqrt{-1}]$ が存在する。
- (5) $\gcd(\alpha, \beta) = 1$ のとき、 α, β は互いに素であるという。このとき、 $\alpha|\beta\gamma \implies \alpha|\gamma$ 。
- (6) $Z[\sqrt{-1}]$ では、既約数は素数でもある。(ヒント: π が既約数のとき、 $\pi|\alpha$ でなければ π, α が互いに素であることを示す。)
- (7) これより、 $Z[\sqrt{-1}]$ では素因数分解の一意可能性が成立する。

レポート提出について

- 締切: 2014 年 2 月 3 日 (月) 20 時頃まで
- 内容: 配布プリントのレポート課題の例のような内容、及び授業に関連する内容で、授業内容の理解または発展的な取組みをアピールできるようなもの
- 分量: プリントのレポート課題を全部提出する必要はなく、問題の重さによって適宜判断して数問取り組めば良い。内容に関しては、このプリントの例に必ずしも拘らず、意欲的な取組みを望む。
- 提出先: 4-574A 室扉のレポートポスト。授業最終回の授業終了後に提出しても良い。電子メール (tsuno-h@cc.sophia.ac.jp 宛) で提出しても良い。