

実 2 次体の基本単数について

中京大 養 久綱 正和

§0. 実 2 次体 $\mathbb{Q}(\sqrt{D})$ の基本単数に関して、現在ではいろいろな事が調べられているが、それらの多くは Ankeny, Chowla, Hasse 共著の 1965 年に発表された論文 [1] を出発点としている。そこにおいて彼らは次の事を示した：

定理 $p = 4n_0^2 + 1$ ($n_0 > 1$ 素数でない) なる素数に対して、実 2 次体 $\mathbb{Q}(\sqrt{p})$ の類数は 1 より大である。

この定理の証明には、 $n + \sqrt{n^2 + 1}$ が実 2 次体 $\mathbb{Q}(\sqrt{n^2 + 1})$ の単数であることを用いている。従って、実 2 次体の (基本) 単数を知る事によって、上の定理を拡張することができよう。Hasse [5] はこのように考えて、genus number は 1 であるか、class number は 1 より大なる実 2 次体を種々構成した。Hasse はそこで、実 2 次体の基本単数に関する Degert の結果 [3] を用いたのである。

以下我々は色々な角度からこれまでに得られた結果をまとめてみよう。

以下, 次の記号を使う。

実 2 次体 $Q(\sqrt{D})$, $D > 0$ square-free integer

判別式 d , 基本単数 $\varepsilon_D = \frac{1}{2}(t_0 + u_0\sqrt{D}) > 1$

単数 $\varepsilon = \frac{1}{2}(t + u\sqrt{D}) > 1$

§ 1. D が与えられたとき, ε_D を explicit に求めること。

あるいはその特徴を見つけること。

(1) Richaud - Degert [3]

$D = n^2 + r$, $-n < r \leq n$ とおくとき, $r \mid 4n$ ならば,

$$\varepsilon_D = \begin{cases} n + \sqrt{D} & , N\varepsilon_D = -\text{sgn } r \quad \dots |r| = 1 \\ \frac{1}{2}(n + \sqrt{D}) & , N\varepsilon_D = -\text{sgn } r \quad \dots |r| = 4 \\ \frac{1}{|r|}(2n^2 + r + 2n\sqrt{D}) & , N\varepsilon_D = 1 \quad \dots |r| \neq 1, 4 \end{cases}$$

以下, $r \mid 4n$ なる条件を満たす実 2 次体を R - D type という。

特に, $|r| = 1$ or 4 の場合を狭義の R - D type という。

(2) Kutsuna [7]

$D = p$ or $2p$, $p \equiv 3 \pmod{4}$ 素数 のとき

$$\varepsilon_D = \begin{cases} a^2 + 1 + ab\sqrt{D} & \dots p \equiv 3 \pmod{8} \\ a^2 - 1 + ab\sqrt{D} & \dots p \equiv 7 \pmod{8} \end{cases}$$

ここで, a, b は $\sqrt{D}$ の連分数展開の周期の半分から得られる。

(3) Nakahara [13]

$D = p\ell$ or $2p\ell$, $p < \ell$ odd primes, p or $\ell \equiv 3 \pmod{4}$,

$D \neq 5(8)$ のとき

$$\varepsilon_D = \begin{cases} a^2 \pm 1 + ab\sqrt{D} \\ \frac{2}{p} a^2 \pm 1 + \frac{2}{p} ab\sqrt{D} \\ \frac{1}{p} a^2 \pm 1 + \frac{1}{p} ab\sqrt{D} \end{cases}$$

(2)と同様に, a, b は $\sqrt{D}$ の連分数展開の周期の半分から得られる。

§ 2. 単数 ε が与えられたとき, それが基本単数であるか否かを判定すること。

(1) $u = 1$ or $2 \Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D$

(2) Yokoi [17] [18]

$u = p$ or $2p$, p prime, $\mathbb{Q}(\sqrt{D})$ は狭義の R - D type ではない。

$$\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D$$

(3) Morikawa [10] [11]

$N\varepsilon = 1$ を仮定し, $\delta = \begin{cases} 0 & \dots D \equiv 1 \pmod{4} \\ 1 & \dots D \equiv 2, 3 \pmod{4} \end{cases}$ とおく。

(i) $u = 2^\delta p^n$, p odd prime > 4 , $n \geq 2$

$$\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D \text{ or } \varepsilon_D^2$$

(ii) $u = 2^\delta p\ell$, p, ℓ primes, $\frac{\sqrt{D}+1}{\sqrt{D}-1} p < \ell$

$$\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D \text{ or } \varepsilon_D^2 \text{ or } \varepsilon_D^4$$

(iii) $u = 2^\delta r\ell$, ℓ prime, $\frac{\sqrt{D}+1}{\sqrt{D}-1} r < \ell$

$$\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D^{2^l}, \quad l \geq 0.$$

(iv) (iii) の仮定の下で $D \neq 1$ (4), $\frac{u}{2}$ odd $\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D$

(5) Kutsuna [7]

(i) $N\varepsilon = 1$ のとき $t < D-2$ or $u < \sqrt{D-4}$ $\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D$

(ii) $N\varepsilon = -1$ のとき $t < D\sqrt{D-6}$ or $u < D-3$ $\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D$

(6) Kutsuna

$N\varepsilon = -1$ のとき

(i) $t = p\zeta$, p, ζ primes, $\zeta < p < \zeta^4 + 5\zeta^2 + 5$, $D \neq 2, 5$
 $\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D$

(ii) $t = rp^k$, p prime, $(r, p) = 1$,

$$r < \begin{cases} p^{2k} + 3 & \dots p \neq 3, 5 \text{ or } p=5, k > 2 \\ 3^{2k-3} & \dots p=3 \end{cases}$$

更に, $\forall r_i | r$ に対して $r_i^2 + 4 = u_i^2 D_i$, D_i square-free とおくと
 $D \neq D_i$. $\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D$

$N\varepsilon = 1$ のとき $t-2, t+2$ は共に平方数でないとする.

(iii) $t-2 = r \cdot p^k$, p prime, $(r, p) = 1$

$$r < \begin{cases} (p^k + 2)^2 & \dots p \geq 11 \text{ or } p=7, k \neq 3 \text{ or } p=5, k \neq 3, 4 \\ (3^{k-3} + 1)^2 & \dots p=3 \end{cases}$$

$\forall r_i | r$ に対して $(r_i + 2)^2 - 4 = u_i^2 D_i$, D_i square-free とおくと
 $D \neq D_i$. $\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_D$

(iv) $t+2 = rp^k$, p prime, $(r, p) = 1$

$$r < (p^k - 3)^2 \dots p \geq 11 \text{ or } p=7, k \neq 3 \text{ or } p=5, k \neq 3, 4, 5$$

$$r < (3^{k-3} - 1)^2 \quad \dots \quad p = 3$$

$$\forall r_i | r \quad \text{に對して} \quad (r_i - 2)^2 - 4 = u_i^2 D_i, \quad D_i: \text{square-free}$$

$$\text{とおくとき} \quad D \neq D_i$$

$$\Rightarrow \quad \varepsilon = \varepsilon_D$$

この結果の証明は，その方針を最後の § で述べることにしよう。

§ 3. u が与えられたとき， $u_0 = u$ となる基本単数をもつ実 2 次体を構成すること。

(1) $N\varepsilon_D = -1$ の場合. Yokoi [17] は $u = p \equiv 1 (4)$ prime のとき示し，Nakahara [12] はそれを一般化した：

$$u = \prod_i p_i^{e_i}, \quad p_i \equiv 1 (4) \text{ primes}, \quad e_i \geq 1 \quad \text{に對して}$$

$$\exists a, b \text{ s.t. } 0 < a < \frac{1}{2} u^2, \quad a^2 + 4 = b u^2. \quad \text{そこで}$$

$$D = u^2 m^2 \pm 2 a m + b \quad (m \geq 2) \quad \text{とおく.} \quad D \sim \frac{D}{4} \text{ が}$$

$$\text{square-free ならば}$$

$$\varepsilon_D = \frac{1}{2} (u^2 m \pm a + u \sqrt{D})$$

(2) $N\varepsilon_D = 1$ の場合. Yokoi [18] は $u = p \equiv 3 (4)$ prime のとき示し，Kutsuna [7] はそれを一般化した：

$$\text{任意の自然数 } u \text{ に對して } u = u_1 \cdot u_2, \quad (u_1, u_2) = 1 \sim 2 \text{ と}$$

$$\text{かけてに分解するとき, } \exists a, b \text{ s.t. } 0 < a \leq u_2^2,$$

$$u_1^2 a + 4 = u_2^2 b. \quad \text{そこで} \quad D = u^2 m^2 + 2 (u_1^2 a + 2) + a b$$

($m \geq 1$) とおく. $D = d$ or $\frac{d}{4}$ (d は判別式) ならば,

$$\varepsilon_D = \frac{1}{2} (u^2 m + u_1^2 a + 2 + u\sqrt{D})$$

§ 4. 大きさの評価.

(1) Hua [6] $N\varepsilon_D = 1$ のとき.

$$\log \varepsilon_D < \sqrt{d} \left(\frac{1}{2} \log d + 1 \right)$$

(2) Takeaki [15] $N\varepsilon_D = 1$ のとき.

D に対して $\exists \ell, m, \Delta (= \text{square-free})$ p. t.

$$D = \Delta(m^2 \Delta \pm 2^{2-\delta}) / \ell^2, \quad \delta = 0, 1, 2.$$

$$\varepsilon_D < 2^\delta \ell^2 D$$

(3) Kutsuna

D に対して $\exists \ell$: least positive integer p. t.

$$\ell^2 D = n^2 + r, \quad -n < r \leq n, \quad r \mid 4n.$$

$$\text{そこで} \quad \delta = \begin{cases} 0 & \dots r \mid 4n, \quad r \nmid 2n \\ 1 & \dots r \mid 2n, \quad r \nmid n \\ 2 & \dots r \mid n \end{cases}, \quad |r| = 2^{2-\delta} \Delta, \quad n = \Delta m$$

とあくと,

$$2\ell\sqrt{D} - 1 < \varepsilon_D < 2\ell\sqrt{D} + 1 \quad \dots \delta = 2, \Delta = 1$$

$$\ell\sqrt{D} - 1 < \varepsilon_D < \ell\sqrt{D} + 1 \quad \dots \delta = 0, \Delta = 1$$

$$\frac{2^\delta}{\Delta} \ell^2 D - 2 < \varepsilon_D < \frac{2^\delta}{\Delta} \ell^2 D + 2 \quad \dots \text{others}$$

この結果の証明は § 6 定理 1 を用いて容易に示すことができる.

(4) Yamamoto [16]

(i) $p_1 < p_2 < \dots < p_n$ primes に対して

$$p_i = p_i \cdot p_i' \text{ in } \mathbb{Q}(\sqrt{D}), \quad p_i \neq p_i' \text{ principal ideals}$$

なる実2次体 $\mathbb{Q}(\sqrt{D})$ が無数に存在するならば, $\exists C_0 =$

$C_0(n, p_1, \dots, p_n)$, 十分大なる D に対し

$$\log \varepsilon_D > C_0 (\log \sqrt{D})^{n+1}$$

(ii) $p < p$ primes, $m_k = (p^k p + p + 1)^2 - 4p$ ($k \geq 1$)

このとき $\mathbb{Q}(\sqrt{m_k})$ は (i) の条件を満たし, $\exists C_0$, 十分大なる D に対し

$$\log \varepsilon_D > C_0 (\log \sqrt{D})^3$$

3.5. 類数問題への応用.

3.0 で述べたように, Idasse [5] は Degeret の結果を用いて, genus number は 1 であるが, class number は 1 より大なる実2次体を構成した。Idasse 以後, Yokoi [17], [18], Nakahara [13] らは実2次体の基本単数を調べ, その結果を用いて, Idasse の方法に従い, class number が 1 より大きい実2次体を構成し, class number の下からの評価を与えた。

これらとは異なる応用としては, 最近発表された Chowla [2] Hartung [4] の結果がある。ここではそれを紹介しよう。

補題 (Ankeny, Artin, Chowla)

d を判別式とする実2次体 $\mathbb{Q}(\sqrt{d})$ の class number を $h = h(d)$

で表わし, その基本単数を $\frac{1}{2}(t_0 + u_0\sqrt{d})$ で表わす.

$d = 3f$, $f \equiv 1 (3)$ square-free positive integer とし, H を虚 2 次体 $\mathbb{Q}(\sqrt{-f})$ の class number とするとき 次の合同式が成り立つ.

$$H \equiv -\frac{u_0}{t_0} f \pmod{3} \quad (3)$$

この補題より $u_0 \equiv 0 (3)$ ならば $H \equiv 0 (3)$ がいえる.

Chowla はこのことを用いて, 次の定理を証明し, Hartung はその拡張を与えたのである:

定理 $p = 27n^2 + 4$ を素数とし, 虚 2 次体 $\mathbb{Q}(\sqrt{-p})$ の class number を H とするとき, $H \equiv 0 (3)$ である.

§ 6. 分類. その他.

すべての実 2 次体 $\mathbb{Q}(\sqrt{D})$ の基本単数は次の様に分類される (Kutsuna [9]):

定理 1 v_0 を $v_0^2 D = n_0^2 + r_0$, $-n_0 < r_0 \leq n_0$, $r_0 \nmid 4n_0$ を満たす最小の正整数とあるとき, 実 2 次体 $\mathbb{Q}(\sqrt{D})$ の基本単数 ε_D は次の通りである:

$$\varepsilon_D = \begin{cases} n_0 + v_0\sqrt{D} & , N\varepsilon_D = -1 \quad \dots \quad r_0 = 1 \\ \frac{1}{2}(n_0 + v_0\sqrt{D}) & , N\varepsilon_D = -1 \quad \dots \quad r_0 = 4 \\ n_0 + \sqrt{D} & , N\varepsilon_D = 1 \quad \dots \quad r_0 = -1 \\ \frac{1}{2}(n_0 + \sqrt{D}) & , N\varepsilon_D = 1 \quad \dots \quad r_0 = -4 \\ \frac{1}{|r_0|}(2n_0^2 + r_0 + 2n_0v_0\sqrt{D}) & , N\varepsilon_D = 1 \quad \dots \quad |r_0| \neq 1, 4 \end{cases}$$

定理 1 の v_0 は $\sqrt{D}$ の正則連分数展開より得られる:

定理 2. D が $p \equiv 3 (4)$ なる素因数をもち, $D \neq 5 (8)$ であるとする。 $\sqrt{D}$ の正則連分数展開の周期を $k (=2m$ 偶数), ν 次近似分数を A_ν/B_ν , ν 次完全商を $\frac{\sqrt{D}+P_\nu}{Q_\nu}$ とするとき,

定理 1 の v_0 は B_{m-1} と一致する。更に, $|r_0| = Q_m$ であり,

$$\varepsilon_D = \frac{1}{Q_m} \{ 2A_{m-1}^2 + (-1)^{m-1} Q_m + 2A_{m-1}B_{m-1}\sqrt{D} \}.$$

最後に, § 2 (6) の証明に必要なことからまとめておこう。単数 $\varepsilon = \frac{1}{2}(t+u\sqrt{D})$, $\varepsilon^n = \frac{1}{2}(t_n+u_n\sqrt{D})$ から定まる t_n, u_n には次の性質がある。

補題 1 $N\varepsilon = -1$ のとき

$$(i) \quad t_n = t^n + \dots + \frac{1}{24}(n^3-n)t^3 + nt \quad \dots \quad n \text{ odd}$$

$$(ii) \quad u_n = u \left\{ \lambda^{\frac{n-1}{2}} - \dots \pm \frac{1}{24}(n^3-n)\lambda \mp n \right\} \quad \dots \quad n \text{ odd}, \quad \lambda = t^2+4 = Du^2.$$

補題 2 $N\varepsilon = 1$ のとき

$$(i) \quad t_{n-2} = (t-2) \left\{ (t-2)^{\frac{n-1}{2}} + \dots + \frac{1}{24}(n^3-n)(t-2) + n \right\}^2 \quad \dots \quad n \text{ odd}$$

$$(ii) \quad t_{n+2} = (t+2) \left\{ (t+2)^{\frac{n-1}{2}} - \dots \pm \frac{1}{24}(n^3-n)(t+2) \mp n \right\}^2 \quad \dots \quad n \text{ odd}$$

$$(iii) \quad u_n = u \left\{ \lambda^{\frac{n-1}{2}} + \dots + \frac{1}{24}(n^3-n)\lambda + n \right\} \quad \dots \quad n \text{ odd}, \quad \lambda = t^2-4 = Du^2.$$

文 献

- [1] Ankeny, Chowla, Hasse: On the class-number of the maximal real subfield of a cyclotomic field, J. reine angew. Math. 217 (1965), 217-220.

- [2] S. Chowla : Congruence properties of class numbers of quadratic fields , J. of Number Theory 6 (1974) , 136-137.
- [3] G. Degert : Über die Bestimmung der Grundeinheit gewisser reell-quadratischer Zahlkörper , Abh. math. Sem. U. Hamb. 22 (1958), 92-97
- [4] P. Hartung : Explicit construction of a class of infinitely many imaginary quadratic fields whose class number is divisible by 3, J. of Number Theory 6 (1974) , 279-281
- [5] H. Hasse , Über mehrklassige , aber eingeschlechtige reell-quadratischer Zahlkörper , Elemente der Math. 20 (1965), 49-59.
- [6] L. K. Hua : On the least solution of Pell's equation , Bull. Amer. Math. Soc. 48 (1942) , 731-735.
- [7] M. Kutsuna : On an explicit formula of the fundamental units of real quadratic fields (in Japanese) , Suron Hanti, 1 (1971), 41-62.
- [8] ——— : On the fundamental units of a certain type of real quadratic fields (in Japanese) , Suron Hanti, 1 (1971), 116-138.
- [9] ——— : On the fundamental units of real quadratic fields , Proc. of Japan Acad. 50 (1974), 580-583.
- [10] ^R Morikawa : On units of real quadratic fields , J. of Number Theory , 4 (1972), 503-507
- [11] ——— : On the fundamental units of certain real quadratic number fields (to appear).

- [12] T. Nakahara : On the determination of the fundamental units of certain real quadratic fields, Mem. Fac. Sci. Kyushu U. 24 (1970) 300-304.
- [13] ——— : On the fundamental units and ~~the~~ an estimate of the class numbers of real quadratic fields, Rep. of fac. of sci. eng. Saga U. 1 (1974), 104-116.
- [14] ^(H-U) Nordhoff : Explizite Darstellungen von Einheiten und ihre Anwendung auf Mehrklassenfragen bei reell-quadratischen Zahlkörpern I, J. reine angew. Math. 268/269 (1974) 131-149.
- [15] A. Takaku : Units of real quadratic fields. Nagoya Math. J. 44 (1971), 51-55.
- [16] Y. Yamamoto : Real quadratic number fields with large fundamental units, Osaka J. of Math. 8 (1971), 261-270.
- [17] ^(H) Yokoi : On real quadratic fields containing units with norm -1, Nagoya Math. J. 33 (1968), 139-152.
- [18] — : On the fundamental unit of real quadratic fields with norm 1, J. of Number Theory. 2 (1970), 106-115.