

Regulator の大きさの評価

東北大学教養部 内田興二

(Koji Uchida)

序. 代数体 K の次数を n , 実共役が r_1 個, 虚の共役が $2r_2$ 個とする. K の regulator を R_K , 判別式を D_K , 類数をは, K に含まれる 1 の中根の個数を w とする. R_K の大きさを n および D_K に関する値で評価することを問題とする. どの 2 つも複素共役でない K の $r_1 + r_2$ 個の同型写像を考へ, K の元 α のそれらの同型による像を $\alpha^{(i)}$, $i=1, \dots, r_1 + r_2$, と記す. $r = r_1 + r_2 - 1$ とし, K の基本単数を $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_r$ とするとき, regulator R_K は行列式

$$R_K = \begin{vmatrix} \log \|\varepsilon_1^{(1)}\| & \cdots & \log \|\varepsilon_r^{(1)}\| \\ \vdots & & \vdots \\ \log \|\varepsilon_1^{(r)}\| & \cdots & \log \|\varepsilon_r^{(r)}\| \end{vmatrix}$$

で与えられる. ここで $\|\cdot\|$ は正規化された絶対値であり, 行列式が正となるように $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_r$ の順序を選んでおく.

K の Dedekind ζ -関数 $\zeta_K(s)$ の $s=1$ における留数は $h \cdot \rho$

となる。ここで ρ は一つのイデアル類に関する partial ζ -関数の留数である。これらの ζ -関数の大きさを評価することによつて R_K の大きさを評価するのの一つの考へ方で、 $\S 1$ で簡単に紹介する。もう一つの方法は行列式 R_K の各列を実 r 次元空間 R^r の格子を生成するベクトルと考へ、その格子の基本領域の体積 R_K を、数の幾何学の方法を用いて評価する方法である。その基本は $\S 2$ に述べる successive minima の議論であるが、それを利用するには R_K そのものよりも R^{r+1} において行列式

$$\bar{R}_K = \begin{vmatrix} \log \|\varepsilon_1^{(1)}\| & \cdots & \log \|\varepsilon_r^{(1)}\| & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \log \|\varepsilon_1^{(r)}\| & \cdots & \log \|\varepsilon_r^{(r)}\| & 1 \\ \log \|\varepsilon_1^{(r+1)}\| & \cdots & \log \|\varepsilon_r^{(r+1)}\| & 1 \end{vmatrix}$$

の各列の生成する格子を考へる方が扱ひやすい。その理由は、 R_K を評価するときを除かれた一つの共役に関する $\log \|\varepsilon_j^{(r+1)}\|$ の大きさが常に関係すること、また

$$\sum_{i=1}^{r+1} \log \|\varepsilon_j^{(i)}\| = 0, \quad j=1, \dots, r$$

により $\bar{R}_K = (r+1)R_K$ が得られ、同時に \bar{R}_K の最後の列が他のすべての列と直交するから、次元を一つ上げても successive minima による評価が悪くならないことによる。

1. ゼータ関数の留数を評価する方法 代数体 K の ζ 関数 $\zeta_K(s)$, または一つのイデアル類に関する partial ζ 関数に対して, 関数等式を用いて実数 $s > 1$ における ζ 関数の値を評価し, それによつて $s=1$ における留数の値を評価する. $\zeta_K(s)$ の値を上から評価する方法は古くから知られており, 留数 $\rho_K \geq \rho$ であること, 及び

$$\rho = \frac{2^{r_1+r_2} \pi^{r_2} R_K}{w \sqrt{|D_K|}}$$

によつて R_K の上からの評価

$$R_K < c_n (\log |D_K|)^{n-1} \sqrt{|D_K|}$$

が Landau [7], Remak [13], Siegel [16] によつて得られた. Zimmert [21] は partial ζ 関数を評価する新しい方法を開発して,

$$R_K \geq 0.02 w \cdot \exp(0.46 r_1 + 0.1 r_2)$$

という下からの評価を得た. 特に, 総実代数体で regulator が最小のものは $\mathbb{Q}(\sqrt{5})$ である.

2. Minkowski の successive minima m 次元空間 \mathbb{R}^m の lattice L に対して, L の i -th successive minimum λ_i とは, L に i 個の一次独立な元 $\alpha_1, \dots, \alpha_i$ で

$$\|\alpha_1\| \leq \lambda, \dots, \|\alpha_i\| \leq \lambda$$

となるものが存在するような λ の最小値をいう.

$$\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_m$$

は明らかであるが、これらの積を評価したい。Lの基本領域の体積を $d(L)$ と表す。 \mathbb{R}^m のすべてのlatticeについての $\lambda_1^m/d(L)$ の上限を δ と記す。また $\lambda_1=1$ であるlattice Lを考えると、半径 $\frac{1}{2}$ の開球には $\text{mod } L$ で合同な点がないから、 $d(L)$ はその球の体積以上である。従って $\lambda_1=1$ であるlattice全体について $d(L)$ の下限を Δ と記すと、 $\Delta > 0$ であるが、 $\delta = \Delta^{-1}$ であることが容易に分る。

定理1 (Minkowski) $d(L) \leq \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_m \leq \delta \cdot d(L)$

証明. 基本領域の辺の長さを考えて、左の不等式は明らか。Lの一次独立な元 $\{c_1, \dots, c_m\}$ を、 $\|c_i\| = \lambda_i$ にとると、Lの基 $\{a_1, \dots, a_m\}$ および \mathbb{R}^m の正規直交基 $\{u_1, \dots, u_m\}$ を、 a_i は c_1, \dots, c_m の一次結合で、 $a_i = a_{i1}u_1 + \dots + a_{im}u_m$ となるようにできる。0でない整数の組 (x_1, \dots, x_m) に対して $x_k \neq 0$ 、 $x_i = 0$ for $i > k$ とすると、 $\sum x_i a_i$ は c_1, \dots, c_{k-1} の一次結合でなく、 $\|\sum x_i a_i\| \geq \lambda_k$ であり

$$\begin{aligned} 1 &\leq \lambda_k^{-2} \|\sum x_i a_i\|^2 = \lambda_k^{-2} \sum_j \left(\sum_i x_i a_{ij} \right)^2 \\ &\leq \sum_j \lambda_j^{-2} \left(\sum_i x_i a_{ij} \right)^2 \end{aligned}$$

を得る。最後の不等式は、仮定からjもk以下の和と考えて

よく, そのとき $\lambda_i \leq \lambda_k$ であることによる。従って

$$b_i = a_{i1} \lambda_1^{-1} u_1 + \dots + a_{im} \lambda_m^{-1} u_m, \quad i=1, \dots, m$$

とおくと $\|\sum x_i b_i\| \geq 1$ となる。即ち $\{b_1, \dots, b_m\}$ を基とする lattice L' に対して $\lambda'_i \geq 1$ である。 b_i の定義から

$$d(L') = (\lambda_1 \dots \lambda_m)^{-1} \cdot d(L)$$

となること及び

$$1/d(L') \leq \lambda_i^m / d(L') \leq \delta$$

により, 定理の右側の不等式が得られる。

δ を評価するには Dirichlet の積分

$$\begin{aligned} & \int \dots \int_D x_1^{p_1-1} \dots x_m^{p_m-1} (1-x_1-\dots-x_m)^{p_0-1} dx_1 \dots dx_m \\ &= \frac{\Gamma(p_0) \dots \Gamma(p_m)}{\Gamma(p_0 + \dots + p_m)} \end{aligned}$$

を用いる。ただし, $D = \{x_1 \geq 0, \dots, x_m \geq 0, x_1 + \dots + x_m \leq 1\}$ 。

特に m 次元単位球の体積 V_m は

$$\begin{aligned} V_m &= \pi^{m/2} / \Gamma(1 + \frac{m}{2}) \\ &= \begin{cases} \pi^l / l! & , \quad m = 2l \\ \pi^l 2^{l+1} / (2l+1)(2l-1)\dots 1, & m = 2l+1 \end{cases} \end{aligned}$$

となる。 L を $\lambda_i = 1$ である lattice とする。 $2L$ の点で原点を中心とし半径 A の球に含まれる点を Q_1, \dots, Q_r とすると

$$r = 2^{-m} d(L)^{-1} A^m V_m + O(A^{m-1})$$

である。一方

$$\phi(x) = \text{Max} \left(0, 1 - \frac{\|x\|^2}{2} \right)$$

なる関数を考えると, $\|a_i - a_j\| \geq 2$ と不等式

$$r \cdot \sum (y - b_i)^2 = \sum_{i < j} (b_i - b_j)^2 + (ry - \sum b_i)^2 \geq \sum_{i < j} (b_i - b_j)^2$$

を用いて \mathbb{R}^m の任意の点 x において

$$\sum \phi(x - a_i) \leq 1$$

となる。原点を中心とし半径 $A + \sqrt{2}$ の球の外では左辺は 0 と

なるので, 左辺の積分は $(A + \sqrt{2})^m \cdot V_m$ 以下であるが

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^m} \sum \phi(x - a_i) dx &= r \cdot \int_{\mathbb{R}^m} \phi(x) dx \\ &= r \cdot \int_{\|x\|^2 \leq 2} \left(1 - \frac{\|x\|^2}{2} \right) dx = r \cdot 2^{\frac{m}{2}} \left(1 + \frac{m}{2} \right)^{-1} V_m \end{aligned}$$

が Dirichlet の積分に帰着して分るので

$$r \leq 2^{-\frac{m}{2}} \left(1 + \frac{m}{2} \right) (A + \sqrt{2})^m$$

となり, $A \rightarrow \infty$ とすることにより

$$\begin{aligned} \delta^{-1} = \Delta &\geq 2^{-\frac{m}{2}} \left(1 + \frac{m}{2} \right)^{-1} V_m \\ &= (\pi/2)^{\frac{m}{2}} / \left(1 + \frac{m}{2} \right) \Gamma \left(1 + \frac{m}{2} \right) = (\pi/2)^{\frac{m}{2}} / \Gamma \left(2 + \frac{m}{2} \right) \end{aligned}$$

が得られる。この節は Cassels [2], 特に P. 80, 120, 205, 249 に
よ, た。

3. 数の幾何による R_K の評価 R_K の大きさを下から評
価する方法は, 体次数 n のみに関係する値で評価する方法も,

判別式 D_K にも関係する評価も Remark [14], [15] に始まる。総実代数体の場合には Pohst [9], [10] によ、 r と共に大きくなる評価が与えられた。判別式を含む評価は $|D_K|$ が十分大きい場合に限るが Silverman [17] によ、 r

$$R_K > C_n (\log d_n |D_K|)^{r-p}$$

という評価が与えられた。ここで r は K の単数群の階数、 p は真部分体の単数群の階数の最大値で C_n, d_n は n のみに関係する定数である。 C_n, d_n の値については Friedman [6] によ、 r 改良された。以下では p を別の値 $\leq p$ でおきかえた評価について述べる。序に述べた行列式 R_K の各列の生成する格子を最後の列に直交する部分空間に制限した格子の基本領域の体積は、最後の列を正規化した行列式 $\sqrt{r+1} \cdot R_K$ に等しく、この r 次元空間に定理 1 を適用して

$$R_K \geq \sqrt{r+1}^{-1} \cdot \delta^{-1} \cdot \prod_{i=1}^r m(\varepsilon_i) \geq (r+1)^{-\frac{r}{2}} \cdot \prod_{i=1}^r m(\varepsilon_i)$$

が得られる。ここで $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_r$ は独立単数で

$$m(\varepsilon_i) = \left(\sum_{j=1}^{r+1} (\log \|\varepsilon_i^{(j)}\|)^2 \right)^{1/2}$$

である。代数体 E の元 α に対して

$$H_E(\alpha) = \prod_{i=1}^{r+1} \text{Max}(1, \|\alpha^{(i)}\|)$$

を α の height とし、 E が m 次 のとき $h(\alpha) = \frac{1}{m} \log H_E(\alpha)$ を absolute logarithmic height とする。

$$m(\varepsilon_i) \geq \frac{1}{\sqrt{r+1}} \sum_{j=1}^{r+1} |\log \|\varepsilon_i^{(j)}\|| = \frac{2r}{\sqrt{r+1}} h(\varepsilon_i)$$

であり, Dobrowolsky [5] により $h(\varepsilon_i)$ は n のみに関係する値で下より評価できる。さらに詳しく評価する K は ε_i を次のように部分体に含まれるものと含まれないものに分ける。

$c > 1$ を定数 (n に関係してよい) とし, F を K の部分体で

$$(*) \quad |D_F| < |D_K|^{1/[K:F]^c}$$

なる不等式をみたす極大な体とする。①はこの不等式をみたし, K はみたさないから, このような F は常に存在する。

定理 2. F の単数群の階数 r とすると, 次数 n のみに関係する定数 $c_n, d_n > 0$ が存在して, $d_n |D_K| > 1$ なる K に対して

$$R_K > c_n (\log d_n |D_K|)^{r-\lambda}$$

が成立つ。

F に含まれない K の元 α を考え, $m = [F(\alpha):F]$ とする。

$D_{F(\alpha)} = D_F^m \cdot N_F(D_{F(\alpha)/F})$ と $D_{F(\alpha)}$ は (*) をみたさないことある。

$$|N_F(D_{F(\alpha)/F})| \geq |D_K|^{(m^c - m)/[K:F]^c}$$

が分る。 α の相対判別式 $\Delta(\alpha)$ は $D_{F(\alpha)/F}$ の倍数であることと, 行列式の Hadamard の不等式により

$$|\Delta(\alpha)| \leq \prod_{i=1}^m (1 + |\alpha^{(i)}|^2 + \dots + |\alpha^{(i)}|^{2(m-1)})$$

$$\leq m^m \cdot \prod_{i=1}^m \text{Max}(1, |\alpha^{(i)}|^{2(m-1)})$$

たす

$$|N_{F(\alpha)/F}(D_{F(\alpha)/F})| \leq m^{[F(\alpha):F]} \cdot H_{F(\alpha)}(\alpha)^{2(m-1)}$$

が得られる。この式の対数をとって $m^{c-1} - 1 \geq (c-1) \log m$ を用いると、 F に含まれない ε_j に対して

$$h(\varepsilon_j) \geq \frac{\log m}{2(m-1)} \cdot \frac{c-1}{n^c} \log(|D_K| / e^{n^c/(c-1)})$$

となる。 $m \leq n$ であること、 F に含まれる ε_j は高々 λ であること、これらには Dobrowolski の定理を利用できることを合わせて、上の R_K の不等式に代入して定理が得られる。特に $c = 1 + \frac{1}{\log n}$ にとると $d_n = n^{-en}$ とすることができ、

注. n が有界で D_K が大きくなる体の族に対して、定理 2 は有効であり、 $\lambda < \rho$ となる場合が多いので Silverman よりよくなる、ている。 CM 体又はその部分体では途中がよくなるので $d_n |D_K| > 1$ という条件は不要となる。しかし、円分体のように n と D_K が同時に大きくなるときには、Pohst による評価より悪くなる。上に触れることのできなか、その内容のものも文献表に加えました。京都に着いてすぐは体調をくずし、この講演を取止め、多くの方に御迷惑をおかけしたことを、お詫びします。

参 考 文 献

- [1] A.M.Berge and J.Martinet, Minorations de hauteurs et petits regulateurs relatifs, Sem. Th. Nombres Bordeaux, 1987-1988, n° 11
- [2] J.W.S.Cassels, An introduction to the geometry of numbers, Grundlehren der Math. 99, Springer
- [3] A.Costa and E.Friedman, Ratios of regulators in totally real extensions of number fields, J.Number theory, 37(1991), pp.288-297
- [4] T.W.Cusick, Lower bounds for regulators, Lec Notes in Math., 1068(1984), pp.63-73
- [5] E.Dobrowolski, On a question of Lehmer and the number of irreducible factors of a polynomial, Acta Arithm., 34(1979), pp.391-401
- [6] E.Friedman, Analytic formulas for the regulator of a number field, Inv. Math., 98(1989), pp.599-622
- [7] E.Landau, Verallgemeinerung eines Pólyaschen Satzes auf algebraische Zahlkörper, Nachr. Göttingen, 1918, pp.478-488
- [8] A.M.Odlyzko, Bounds for discriminants and related estimates for class numbers, regulators and zeros of zeta functions:a survey of recent results, Sem. Th. Nombres Bordeaux 2(1990), pp.119-141
- [9] M.Pohst, Regulatorabschätzungen für total reelle algebraische Zahlkörper, J.Number Theory, 9(1977), pp.459-492
- [10] M.Pohst, Eine Regulatorabschätzung, Abh.Hamburg, 47(1978), 95-106

- [11] M.Pohst-H.Zassenhaus, On effective computation of fundamental units I,
Math. of Computation, 38(1982), pp.275-291
- [12] M.Pohst-H.Zassenhaus, On effective computation of fundamental units II,
Math. of Computation, 38(1982), pp.293-329
- [13] R.Remak, Elementare Abschätzungen von Fundamenteinheiten und des
Regulators eines algebraischen Zahlkörpers, J. für Math.,165(1931),
pp.159-179
- [14] R.Remak, Über die Abschätzung des absoluten Betrages des Regulators eines
algebraischen Zahlkörpers nach unten, J. für Math. 167(1932), pp.360-378
- [15] R.Remak, Über Grössenbeziehungen zwischen Discriminante und Regulator eines
algebraischen Zahlkörpers, Compositio Math.,10 (1952)
- [16] C.L.Siegel, Abschätzung von Einheiten, Nachr.Göttingen, 1969, pp.71-86
- [17] J.H.Silverman, An inequality relating the regulator and the discriminant of
a number field, J. Number Theory, 19(1984), pp.437-442
- [18] J.H.Silverman, The Thue equation and height functions, Progress in Math.,
31(1983), pp.259-270
- [19] C.J.Smyth, On the product of the conjugates outside the unit circle of an
algebraic integer, Bull. London Math. Soc., 3(1971), pp.169-175
- [20] K.Uchida, On Silverman's estimate of regulators, to appear
- [21] R.Zimmert, Ideale kleiner Norm in Idealklassen und eine Regulator-
abschätzung, Inv.Math.,62(1981), pp.367-380