

Jacobi 形式と Selberg zeta 関数

立教大学理学部 荒川恒男

1 Introduction

以下、 $\Gamma = SL_2(\mathbf{Z})$ 、 $\mathcal{H}$ を上半平面とする。
1950 年代に Selberg [Se1,2] は $\mathcal{H}$ 上の不変微分作用素

$$\Delta = y^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)$$

の $L^2(\Gamma \backslash \mathcal{H})$ におけるスペクトル分解の研究を通して、Selberg 跡公式の理論を構築し、Selberg zeta 関数を導入した。Selberg zeta 関数は $\Gamma = SL_2(\mathbf{Z})$ の場合には次で与えられる:

$$Z_\Gamma(s) = \prod_{\{P_0\}_\Gamma, \operatorname{tr} P_0 > 2} \prod_{n=0}^{\infty} (1 - N(P_0)^{-s-n}) \quad (\operatorname{Re}(s) > 1)$$

ここで、 P_0 は $\operatorname{tr} P_0$ を満たす Γ の原始的 hyperbolic 元の Γ -共役類をわたる。 $N(P_0)$ は P_0 の固有値 (> 1) の 2 乗を意味する。 $Z_\Gamma(s)$ は $\operatorname{Re}(s) > 1$ で絶対収束し、Selberg 跡公式を介して全 s -平面上の有理型関数に解析接続され、ある関数等式を満たす。これが、Selberg の記念碑的な結果の一部である。

Γ は非常に良い arithmetic な群なので、この場合、 $Z_\Gamma(s)$ は単純な極めて arithmetic な表示をもつ:

$$Z_\Gamma(s) = \prod_{n=0}^{\infty} \prod_{D>0} \left(1 - \varepsilon_D^{-2s-2n} \right)^{h(D)}$$

ここで、 D は $D \equiv 1 \pmod{4}$ ないしは $D \equiv 0 \pmod{4}$ なる正整数をわたり、 $h(D)$ は判別式 D の整係数 2 元 2 次形式の $SL_2(\mathbf{Z})$ -同値による類数を表す。 ε_D は Pell 方程式 $x^2 - Dy^2 = 4$ の基本解 ($\varepsilon_D = \frac{t + \beta\sqrt{D}}{2}$, $t^2 - D\beta^2 = 4$) で、 $\varepsilon_D > 1$ を満たすものである。この表示は Hejahl [He] の p.518 にある。

このノートの目的は、筆者の [Ar1, 2] で導入された、Jacobi 形式の空間と密接な関係にある theta multiplier system つきの Selberg zeta 関数を、上記 Selberg zeta 関数と対比して、なるべく分かりやすく説明することにある。

2 Jacobi 形式

Theta 級数

$e(w) = \exp(2\pi iw)$ ($w \in \mathbb{C}$) とおく。

$\mathcal{D}$ を $\mathcal{H}$ と $\mathbb{C}$ の直積とする: $\mathcal{D} = \mathcal{H} \times \mathbb{C}$. m を正整数とし、固定する。整数 r に対し、theta 級数

$$\theta_r(\tau, z) := \sum_{\lambda \in \mathbb{Z}} e\left(m\tau\left(\lambda + \frac{r}{2m}\right)^2 + 2mz\left(\lambda + \frac{r}{2m}\right)\right) \quad (\tau, z) \in \mathcal{D}$$

を定義する。 $\theta_{r+2m}(\tau, z) = \theta_r(\tau, z)$ であるので、 r は $\mathbb{Z}/2m\mathbb{Z}$ の元とみなしてよい。 τ, z の 2 変数の関数としての theta 級数が Jacobi 形式の原形である。すなわち、 $\theta_r(\tau, z)$ は z の関数としてはアーベル関数としての性質

$$\theta_r(\tau, z + \lambda\tau + \mu) = e(-m\lambda^2 - 2m\lambda z)\theta_r(\tau, z) \quad \lambda, \mu \in \mathbb{Z}$$

を持ち、 τ の関数としてはある種の保型関数になる。保型性を記述するため、 $\mathbb{Z}/2m\mathbb{Z}$ の元に一定の順序をつけておく。上記の theta 級数 $\theta_r(\tau, z)$ ($r \in \mathbb{Z}/2m\mathbb{Z}$) をこの順序で縦ベクトルに並べたものを $\Theta(\tau, z)$ とする:

$$\Theta(\tau, z) := \left(\theta_r(\tau, z)\right)_{r \in \mathbb{Z}/2m\mathbb{Z}} = \begin{pmatrix} \dots \\ \theta_r(\tau, z) \\ \dots \end{pmatrix}.$$

$z \in \mathbb{C}, z \neq 0$ に対し、 $z^{1/2}$ の分枝を $-\pi < \arg z \leq \pi$ に選ぶ。次の変換公式が成り立つ。

theta 公式

$$(*) \quad \Theta(M(\tau, z)) = e\left(\frac{mcz^2}{c\tau + d}\right)(c\tau + d)^{1/2}U(M)\Theta(\tau, z) \quad \forall M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \Gamma$$

ここで、

$$M(\tau, z) = \left(\frac{a\tau + b}{c\tau + d}, \frac{z}{c\tau + d}\right)$$

とおいた。 $U(M) = (u_{r,s}(M))_{r,s \in \mathbb{Z}/2m\mathbb{Z}}$ は unique に定まる $2m$ 次の unitary 行列である。

ここで大切な点は、 $U(M)$ が modular 群 Γ の射影表現になることである:

$$U(M_1 M_2) = \varepsilon(M_1, M_2)U(M_1)U(M_2) \quad M_1, M_2 \in \Gamma, \quad \varepsilon(M_1, M_2) = \pm 1$$

$U(M)$ は theta multiplier system と呼ばれる。 $\varepsilon(M_1, M_2)$ は正確には

$$\varepsilon(M_1, M_2) = \frac{J(M_1, M_2 \langle \tau \rangle)^{1/2} J(M_2, \tau)^{1/2}}{J(M_1 M_2, \tau)^{1/2}}$$

で与えられる。この値は τ には依らない。ここで、 $M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ に対し、 $J(M, \tau) = c\tau + d$ である。

例 $m=1$ の場合: このとき、 $\mathbf{Z}/2\mathbf{Z} = \{0, 1\}$ と思ってよい。

$$\theta_0(\tau, z) = \sum_{\lambda \in \mathbf{Z}} e(\tau \lambda^2 + 2\lambda z), \quad \theta_1(\tau, z) = \sum_{\lambda \in \mathbf{Z}} e\left(\tau \left(\lambda + \frac{1}{2}\right)^2 + 2z\left(\lambda + \frac{1}{2}\right)\right),$$

$$\Theta(\tau, z) = \begin{pmatrix} \theta_0(\tau, z) \\ \theta_1(\tau, z) \end{pmatrix}.$$

であり、

$$U\left(\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}, \quad U\left(\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}\right) = \frac{1+i}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

となる (証明は [E-Z] にある)。

Jacobi 形式

$G = SL_2(\mathbf{R})$ とおき、2 次の実 symplectic 群を $Sp_2(\mathbf{R})$ とする:

$$Sp_2(\mathbf{R}) = \left\{ g \in GL_4(\mathbf{R}) \mid {}^t g \begin{pmatrix} 0 & 1_2 \\ -1_2 & 0 \end{pmatrix} g = \begin{pmatrix} 0 & 1_2 \\ -1_2 & 0 \end{pmatrix} \right\}.$$

Jacobi 群 G^J は、次の形

$$\begin{aligned} (\#) \quad & \begin{pmatrix} a & b & & \\ & 1 & & \\ c & d & & \\ & & 1 & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & \mu & \\ & 1 & \mu & \rho \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & & \\ \lambda & 1 & & \\ & & 1 & -\lambda \\ & & & 1 \end{pmatrix} \\ & \left(M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in G, \quad \lambda, \mu, \rho \in \mathbf{R} \right) \end{aligned}$$

の元の成す $Sp_2(\mathbf{R})$ の部分群とする。(＃) の形の元を簡単のため $(M, (\lambda, \mu), \rho)$ と書く。 $G = SL_2(\mathbf{R})$ は単射 $M \rightarrow (M, (0, 0), 0)$ により、自然に G^J に埋めこまれる。Jacobi 群 G^J は、 G と Heisenberg 群 H との半直積になる:

$$G^J = G \triangleright H$$

ただし、

$$H = \{(1_4, (\lambda, \mu), \rho) \mid \lambda, \mu, \rho \in \mathbf{R}\}$$

であり、Jacobi 形式のアーベル関数としての性質を支配する部分群である。 G^J は上半平面と $\mathbf{C}$ との直積 $\mathcal{D} = \mathcal{H} \times \mathbf{C}$ に作用する: $g = (M, (\lambda, \mu), \rho) \in G^J$ と $(\tau, z) \in \mathcal{D}$ に対し、

$$g(\tau, z) := \left(\frac{a\tau + b}{c\tau + d}, \frac{z}{c\tau + d} \right).$$

ただし、 $M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ とおいた。次に保型因子を定義する。 $m \in \mathbf{Z}_{>0}$, $k \in \mathbf{Z}$ に対し、

$$J_{m,k}(g, (\tau, z)) := (c\tau + d)^k e \left(-m\rho - m\lambda^2\tau - 2m\lambda z + \frac{cm}{c\tau + d}(z + \lambda\tau + \mu)^2 \right)$$

とおく。この保型因子は性質

$$J_{m,k}(g_1 g_2, (\tau, z)) = J_{m,k}(g_1, g_2(\tau, z)) J_{m,k}(g_2, (\tau, z)) \quad (g_1, g_2 \in G^J)$$

を満たす。 G^J の最も自然な離散群 Γ^J を

$$\Gamma^J := \{(M, (\lambda, \mu), \rho) \mid M \in \Gamma, \lambda, \mu, \rho \in \mathbf{Z}\}$$

で定義する。

定義 (Jacobi forms of weight k , index m)

$$J_{k,m}(\Gamma) := \left\{ \varphi : \mathcal{D} \longrightarrow \mathbf{C} \left| \begin{array}{l} \text{(i) } \varphi \text{ は } \mathcal{D} \text{ 上正則} \\ \text{(ii) } \varphi(\gamma(\tau, z)) = J_{m,k}(\gamma, (\tau, z)) \varphi(\tau, z) \quad \forall \gamma \in \Gamma^J \\ \text{(iii) ある Fourier 展開をもつ} \end{array} \right. \right\}$$

として、weight k , index m の Jacobi 形式の空間を定義する。ここで Fourier 展開は次の形である:

$$\varphi(\tau, z) = \sum_{\substack{n, r \in \mathbf{Z} \\ 4mn - r^2 \geq 0}} c(n, r) e(n\tau + rz)$$

cuspidal forms の空間は Fourier 係数に関する条件によって

$$J_{k,m}^{cusp}(\Gamma) := \left\{ \varphi \in J_{k,m}(\Gamma) \mid c(n, r) = 0 \text{ if } 4mn - r^2 = 0 \right\}$$

として定義する。

Remark weight k , index m の Jacobi 形式については Eichler-Zagier の非常に優れた exposition である [E-Z] に種々の側面から大変興味深い研究がある。

Jacobi 形式と先程の theta 級数との関係は、

$$\varphi \in J_{k,m}(\Gamma) \implies \varphi(\tau, z) = \sum_{r \in \mathbf{Z}/2m\mathbf{Z}} h_r(\tau) \theta_r(\tau, z) = \mathbf{h}(\tau) \Theta(\tau, z)$$

で与えられる。ここで $\mathbf{h}(\tau)$ は

$$\mathbf{h}(\tau) = (\dots, h_r(\tau), \dots)$$

とおいた横ベクトルである。各係数 $h_r(\tau)$ は τ の正則関数である。 $\mathbf{h}(\tau)$ は次の保型性を満たす半整数 weight のベクトル値保型形式である:

$$\mathbf{h}(M(\tau))U(M) = (c\tau + d)^{k-1/2} \mathbf{h}(\tau) \quad \forall M \in \Gamma$$

後の都合上、skew-holomorphic Jacobi 形式も導入する:

$$J_{k,m}^{sk}(\Gamma) := \left\{ \varphi : \mathcal{D} \longrightarrow \mathbf{C} \left| \begin{array}{l} \text{(i) } \varphi \text{ は } \mathcal{D} \text{ 上実解析的} \\ \text{(ii) } \varphi(\gamma(\tau, z)) = J_{m,0}(\gamma, (\tau, z)) \overline{(c\tau + d)}^{k-1} \times \right. \\ \quad \left. |c\tau + d| \varphi(\tau, z) \quad \forall \gamma \in \Gamma^J \right. \\ \text{(iii) ある Fourier 展開をもつ} \end{array} \right\}$$

$J_{k,m}^{sk}(\Gamma)$ の元を weight k , index m の skew-holomorphic Jacobi 形式と呼ぶ。Fourier 展開は

$$\varphi(\tau, z) = \sum_{\substack{n, r \in \mathbf{Z} \\ 4mn - r^2 \leq 0}} c(n, r) e \left(n\bar{\tau} + \frac{i}{2m} r^2 \text{Im}\tau + rz \right) \quad (\varphi \in J_{k,m}^{sk}(\Gamma))$$

と書ける。cusp forms の空間は

$$J_{k,m}^{sk, cusp}(\Gamma) := \left\{ \varphi \in J_{k,m}^{sk}(\Gamma) \mid c(n, r) = 0 \text{ if } 4mn - r^2 = 0 \right\}$$

である。Jacobi 形式の空間 $J_{k,m}(\Gamma)$, $J_{k,m}^{sk}(\Gamma)$ の次元は有限であることが知られている。

3 Selberg zeta 関数

m を固定された正整数とし、 $U(M)$ を (#) で与えられた theta multiplier system とする。 $U(-1_2)$ は固有値 $\pm e^{\pi i/2}$ をもち、

$$U(-1_2) = e^{-\pi i/2} \cdot Q \begin{pmatrix} 1_{m+1} & 0 \\ 0 & -1_{m-1} \end{pmatrix} Q^{-1} \quad \exists Q \text{ } 2m \text{ 次ユニタリ行列}$$

と書ける。定義から $U(M)$ は $U(-1_2)$ と可換となるので

$$U(M) = Q \begin{pmatrix} U_+(M) & 0 \\ 0 & U_-(M) \end{pmatrix} Q^{-1} \quad \forall M \in \Gamma$$

の形に分解される。この分解は theta の空間を even theta と odd theta の空間に分解することに相当する。

$U_{\pm}(M)$ は Fischer [Fi] の本の意味で multiplier system になる。Hejhal [He]、Fischer [Fi] に multiplier system つきの Selberg zeta 関数の一般論があり、それに従って、theta multiplier system $U_{\pm}(M)$ つきの 2 種類の Selberg zeta 関数を定義する:

Selberg zeta 関数 [Ar1, 2]

$$Z_{m,\pm}(s) := \prod_{\{P_0\}_{\Gamma}, \text{tr} P_0 > 2} \prod_{n=0}^{\infty} \det(1_{m\pm 1} - U_{\pm}(P_0)N(P_0)^{-s-n})$$

で定義する。この zeta 関数はユニタリ行列 Q の取り方に依らない。 $U_{\pm}(P_0)$ は unitary なので、 $Z_{m,\pm}(s)$ は $\text{Re}(s) > 1$ で絶対収束する。

$m = 1$ のとき、 $Z_{m,+}(s)$ のみ現れる。

ここで、[Ar2] でもう少し一般の形の Selberg zeta 関数が定義されていることに注意する。

これらの Selberg zeta 関数に深く関連する保型形式の空間を与えよう:

k を 0 以上の整数、 $\kappa = (k - 1/2)/2$ とおく。半整数保型因子を

$$j_M(\tau, k) := \exp(i(k - 1/2)\arg(c\tau + d)) \quad \left(M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in G \right)$$

で定義する。保型形式の空間は

$$\mathcal{H}_k := \left\{ h: \mathcal{H} \longrightarrow \mathbb{C}^{2m} \mid \begin{array}{l} \text{measurable} \\ h(M\langle \tau \rangle)U(M) = j_M(\tau, k)h(\tau), \quad M \in \Gamma \\ \int_{\Gamma \backslash \mathcal{H}} \|h(\tau)\|^2 d\omega(\tau) < +\infty \end{array} \right\}$$

で定義する。ここで、 $\mathbf{C}^{2m}$ は $2m$ 次の横ベクトルの空間、 $d\omega(\tau)$ は $\mathcal{H}$ 上の不変測度とする。空間 $\mathcal{H}_k$ で微分作用素:

$$\Delta_k := \eta^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \right) - i \left(k - \frac{1}{2} \right) \eta \frac{\partial}{\partial \xi} \quad (\tau = \xi + i\eta)$$

のスペクトル分解を考える。 $s \in \mathbf{C}$ に対して

$$\mathcal{H}_k(s) := \left\{ f \in \mathcal{H}_k \mid \begin{array}{l} \text{of } C^2 \text{ class} \\ -\Delta_k f = s(1-s)f \end{array} \right\}$$

とおく。 $\mathcal{H}_k(s)$ は実解析的 Jacobi 形式の空間と密接な関係がある ([Ar1], Proposition 5.1)。例えば

$$k \geq 2 \implies \mathcal{H}_k(\kappa) \cong J_{k,m}^{cusp}(\Gamma) \quad \left(\kappa = \frac{k-1/2}{2} \right).$$

上記の設定で "Multiplier system つきの Selberg 跡公式" の一般論にのせる。Multiplier system つきの Selberg 跡公式については、Hejhal が [He] で詳細な議論をしているが、ご存じのように、かなり読みにくい。Fischer [Fi] に、self-contained で比較的簡潔な優れた記述がある。この 2 つ以外には、きちんと書かれたものは無いようである。筆者は Fischer の formulation を用いて、上記の Selberg zeta 関数の解析接続、関数等式、零点の位数と Jacobi 形式の空間の次元との関係等に関して、一定の結果を得た (詳細は [Ar1, 2] 参照)。

Theorem 1 ([Ar1], Theorem 4.3) Selberg zeta 関数 $Z_{m,\pm}(s)$ は s の有理型関数に解析接続され、ある関数等式を満たす。区間 $0 \leq s \leq 1$ の零点を除けば $\operatorname{Re}(s) = 1$ 上に零点が存在する。

関数等式については精密な形を書くと長くなるので、興味のある方は [Ar1], Theorem 4.3 を見て下さい。

Selberg 跡公式の系として、次の定理も成り立つ。

Theorem 2 (i) $\dim_{\mathbf{C}} J_{1,m}^{sk}(\Gamma) = \operatorname{Ord}_{s=3/4} Z_{m,+}(s) = \operatorname{Res}_{s=3/4} (Z'_{m,+}/Z_{m,+}(s))$

(ii) $\dim_{\mathbf{C}} J_{1,m}(\Gamma) = \operatorname{Ord}_{s=3/4} Z_{m,-}(s) = \operatorname{Res}_{s=3/4} (Z'_{m,-}/Z_{m,-}(s))$

(iii) $\dim_{\mathbf{C}} J_{2,m}^{cusp}(\Gamma) = \operatorname{Ord}_{s=3/4} Z_{m,+}(s) + \lambda(m)$

$$(iv) \quad \dim_{\mathbf{C}} J_{2,m}^{sk, cusp}(\Gamma) = \text{Ord}_{s=3/4} Z_{m,-}(s) + \mu(m)$$

ここで $\lambda(m)$, $\mu(m)$ は初等的に書ける量で、正確な定義は [Ar1], (5.4) にある。

この定理の帰結として大切と思われる点を注意しておく。

上記定理より

$$(\star) \quad \begin{aligned} \dim_{\mathbf{C}} J_{2,m}^{cusp}(\Gamma) &= \dim_{\mathbf{C}} J_{1,m}^{sk}(\Gamma) + \lambda(m) \\ \dim_{\mathbf{C}} J_{2,m}^{sk, cusp}(\Gamma) &= \dim_{\mathbf{C}} J_{1,m}(\Gamma) + \mu(m) \end{aligned}$$

公式 $(\star)$ は、空間 $J_{2,m}^{cusp}(\Gamma)$ と空間 $J_{1,m}^{sk}(\Gamma)$ との間のある種の双対性 (duality) を記述していると考えられる ([Sk-Za2], Sect.3, (11) を見よ)。

一方、Skoruppa ([Sk], [Sk-Za1]) により、

$$\dim_{\mathbf{C}} J_{1,m}^{sk}(\Gamma) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{d|m} 1 + \delta(m = \text{square}) \right\}$$

であることが知られている。ここで

$$\delta(m = \text{square}) = \begin{cases} 1 & \text{if } m = \text{square} \\ 0 & \text{if } m \neq \text{square} \end{cases}$$

この次元公式の証明には、ある種の重さ $1/2$ の保型形式の空間は theta 級数で張られるという Serre-Stark の結果 [Se-St] が用いられている。

また Eichler-Zagier [E-Z] により

$$\dim_{\mathbf{C}} J_{1,m}(\Gamma) = 0$$

であることが知られている。これらの結果と、上記 Theorem 2, (i), (ii) を合わせると

$$\text{Theorem 3 (i)} \quad \text{Ord}_{s=3/4} Z_{m,+}(s) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{d|m} 1 + \delta(m = \text{square}) \right\}$$

$$(ii) \quad \text{Ord}_{s=3/4} Z_{m,-}(s) = 0, \quad \text{i.e., } Z_{m,-}(3/4) \neq 0$$

という綺麗な式になる。(i) は Selberg zeta 関数 $Z_{m,+}(s)$ が $s = 3/4$ に真に零点をもつことを主張しているわけで、 $Z_{m,+}(s)$ については $1/2 \leq s \leq 1$ の範囲で Riemann

Hypothesis が成り立たないことになる。

最後に、問題を一つ提出して、この稿の終わりとしたい。

Problem Selberg zeta 関数 $Z_{m,\pm}$ の 2 次形式の類数などを用いた積表示を求めよ。

この問題に対するアプローチの仕方としては、積表示で考えるのは難しいので対数微分を取って、

$$\frac{Z'_{m,\pm}(s)}{Z_{m,\pm}} = \sum_{\{P_0\}_\Gamma, \text{tr} P_0 > 2} \sum_{k=1}^{\infty} \text{tr} U_{\pm}(P_0^k) \cdot \log N(P_0) \cdot \frac{N(P_0)^{-ks}}{1 - N(P_0)^{-ks}}$$

の形で考える。 $m = 1$ のときは次の 2 段階で考える。

(i) $\text{tr} U(P_0^k)$ の計算

(ii) $\sum_{\{P_0\}_\Gamma, \text{tr} P_0 > 2} \text{tr} U(P_0^k)$ の計算

(i) については、この跡は Gauss 和を用いて表される ([Sk-Za2], Theorem 2 or [Ar2], Proposition 3.6)。

ガウス和をさらに簡単にする為には、(ii) の考察が必要で、2 次形式論的な議論が必須のように思われる。

参考文献

- [Ar1] Arakawa, T.: Selberg zeta functions associated with a theta multiplier system of $SL_2(\mathbb{Z})$. Math. Ann. **293**(1992), 213-237.
- [Ar2] Arakawa, T.: Selberg zeta functions and Jacobi forms. Adv. Studies in Pure Math. **21**(1992), 181-218.
- [E-Z] Eichler, M. and Zagier, D.: The theory of Jacobi forms. Birkhäuser: Boston, Basel, Stuttgart, 1985.
- [Fi] Fischer, J.: An approach to the Selberg trace formula via the Selberg zeta-function. Lecture Notes in Math. 1253, Springer, 1987.

- [He] Hejahl, D. A.: The Selberg trace formula for $PSL(2, \mathbf{R})$. Vol.2 Lecture Notes in Math. 1001, Springer, 1983.
- [Se1] Selberg, A.: Harmonic analysis and discontinuous groups in weakly symmetric Riemannian space with applications to Dirichlet series, J. Indian Math. Soc., **20**(1956), 47-87.
- [Se2] Selberg, A.: Harmonic Analysis, in "Collected papers Vol.1", Springer, 1989, pp. 626-674.
- [Se-St] Serre, J. P. and Stark, H.: Modular forms of weight $1/2$, Lecture Notes in Math. 627, Springer, 1983, pp. 27-67.
- [Sk] Skoruppa, N-P.: Über den Zusammenhang zwischen Jacobiformen und Modulformen halbganzen Gewichts, Bonner math. Schriften 159, Bonn, 1985.
- [Sk-Za1] Skoruppa, N-P. and Zagier, D.: Jacobi forms and a certain space of modular forms, Invent. math., **94**(1988), 113-146.
- [Sk-Za2] Skoruppa, N-P. and Zagier, D.: A trace formula for Jacobi forms, J. reine angew. Math. **393**(1989), 168-198.