

Highest Weight Vectors for Generalized Gelfand-Graev
Representations of Semisimple Lie Groups

京大理 山下 博 (Hiroshi YAMASHITA)

§0. 要約. G を線型かつ単純な連結リ-群で, Riemann対称空間 G/K が Hermite 型であるものとする. 我々は, G の正則疎系列表現, もっと一般には $\mathfrak{g} = \text{Lie}(G)$ の compact Cartan 部分環 \mathfrak{h} に関して highest weight $\lambda \in \mathfrak{h}_\mathbb{C}^*$ をもつ G の既約 admissible 表現の, generalized Gelfand-Graev 表現 (= GGGR) $\text{Ind}_N^G(\xi_+)$ の中への (G の) 表現としてのうめこみについて, [5] の手法をもとにして論ずる. 言い換えれば, 既約 admissible highest weight module の (N, ξ_+) 型 Whittaker model を論ずる. ここに, N は Siegel 領域 G/K の $\check{\text{S}}\text{ilov}$ 境界と標準的に微分同型な G の巾単部分群であり, ξ_+ は N のある既約 unitary 表現である. この N 及び ξ_+ の正確な定義は §2 において述べる.

本報告のうちの本論は, 主に次の3つの部分からなる.

第一 (§3). C^∞ に誘導された GGGR $C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ に関する K -有限な λ -highest weight vector を, 全て具体的に求める (定理 3.3).

これは, [5]における計算を少し modify することによりなされる.

第二 (§4). §3 で求めた highest weight vector が, unitary に誘導された GGGR $L^2\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ の表現空間に属するため \wedge の満たすべき必要十分条件を手える (定理 4.1). この条件は, ちょうど正則疎系列表現に関する Harish-Chandra の non-vanishing 条件に他ならないことが判る.

第三 (§5). highest weight をもつ 既約 admissible 表現の (N, ξ_+) 型 Whittaker model について, 定理 3.2 および 4.1 から従う結果を述べる (定理 5.3 及び 5.4). 特に, 正則疎系列表現の (N, ξ_+) 型 WM については, 完全な結果が得られたことになる (定理 5.5). しかし, 正則疎系列に属さない highest weight 表現の Whittaker model については, 未だに研究の余地があると筆者は考える.

また, 序論 (§1) においては, 本論 (§2-§5) における議論の意味を明確にするために, 半単純リー群の表現の Whittaker model について概説する. 更には, M. Hashizume ([5]) 及び H. Rossi - M. Vergne ([12]) の研究と 本論説 との関連を明らかにしておく.

§1. 序論; 半単純リー群の表現の Whittaker model

1.1. Whittaker model の概念. G を中心有限な連結半単純リー群, \mathfrak{g} を G のリー環とする. Hilbert 空間 \mathcal{H} 上の G の連

続表現 π が admissible であるとは、極大 compact 部分群 K ($\subseteq G$) への制限 $\pi|_K$ が K の表現として重複度有限になることをいう。admissible 表現 (π, \mathcal{H}) に対し、 π に関して K -有限な vector 全体のなす \mathcal{H} の部分空間を \mathcal{H}_K で表す。この時、 $\mathcal{H}_K \subseteq \mathcal{H}^\omega$ ($= \pi$ の analytic vector 全体のなす空間) が成立つ。また、 π から自然に定まる \mathcal{H}^ω 上への G の表現を微分する事により得られる \mathfrak{g} の作用につき、 \mathcal{H}_K は stable になる。 \mathcal{H}_K は明らかに K -加群だから、結局、 \mathcal{H}_K は (\mathfrak{g}, K) -加群の構造をもつ。これを π_K で表し、 (π_K, \mathcal{H}_K) を π に対応する Harish-Chandra 加群 と呼ぶ。 π が G の表現として既約ならば、 π_K も (\mathfrak{g}, K) -加群として既約になる。また、この逆も正しい。

さて、 G の中単部分群 N の既約 unitary 表現 $(\xi, \mathcal{H}(\xi))$ を考える。 G の既約 admissible 表現 π が“誘導表現” $\text{Ind}_N^G(\xi)$ の部分表現として“実現”できる時、 π は (N, ξ) 型 Whittaker model ($= \text{WM}$) を持つという。“誘導表現”や“実現”の意味を取り換える事によって、様々な文脈で WM の概念を考え得る。例えば、

(a) unitary 表現の WM ($= L^2\text{-WM}$). G の既約 unitary 表現を、 ξ から unitary に誘導された表現 $L^2\text{-Ind}_N^G(\xi)$ の部分表現として実現すること。

(b) smooth な表現の WM ($= C^\infty\text{-WM}$). 既約 admissible 表現 π に関する C^∞ -vector のなす空間上に自然に定まる G の smooth

な表現 π_∞ を, ξ から C^∞ に誘導された表現 $C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi)$ の中へ連続にうめこむこと.

(c) (\mathfrak{g}, K) -加群の WM (= (\mathfrak{g}, K) -WM). π の Harish-Chandra 加群 π_K を, (\mathfrak{g}, K) -加群 $C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi)$ の部分 (\mathfrak{g}, K) -加群として実現すること.

ここで, C^∞ に誘導された表現 $C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi)$ の定義は次の通り. $\mathcal{X}(\xi)$ に値をもつ G 上の C^∞ -函数 F で, 条件 $F(qn) = \xi(n)^{-1} F(q)$ ($n \in N, q \in G$) を満すもの全体のなす空間を $C^\infty(G; \xi)$ で表し, 左移動による $C^\infty(G; \xi)$ 上への G の表現を π_ξ で表す. $C^\infty(G; \xi)$ 上に通常の Schwartz 位相を入れる事により, π_ξ は G の smooth な表現を定める. また, $C^\infty(G; \xi)$ は, G の作用を微分することにより, (\mathfrak{g}, K) -加群の構造をもつ. $C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi) = (\pi_\xi, C^\infty(G; \xi))$ とおく.

3通りの WM の概念 L^2 -WM, C^∞ -WM 及び (\mathfrak{g}, K) -WM の間には, 次の様な関係がある: G の既約 unitary 表現 U が (N, ξ) 型 L^2 -WM を持てば, U_∞ は C^∞ -WM をもつ. また, G の既約 admissible 表現 π に対し, π_∞ が C^∞ -WM をもてば, Harish-Chandra 加群 π_K は (\mathfrak{g}, K) -WM をもつ. 更に, うめこみを与える intertwining 作用素のなす空間のあいだには,

$$\begin{aligned} \text{Hom}_G(U, L^2\text{-Ind}_N^G(\xi)) &\hookrightarrow \text{Hom}_G(U_\infty, C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi)), \\ \text{Hom}_G(\pi_\infty, C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi)) &\hookrightarrow \text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(\pi_K, C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi)), \end{aligned}$$

なる標準的な包含関係がある. ここで, G の連続表現 T_i

(resp. (\mathfrak{g}, K) -加群 Φ_i) ($i=1, 2$) に対して, T_1 から T_2 への連続な intertwining 作用素 (resp. Φ_1 から Φ_2 への (\mathfrak{g}, K) -加群準同型) のなる空間を $\text{Hom}_{\mathbb{G}}(T_1, T_2)$ (resp. $\text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(\Phi_1, \Phi_2)$) で表す.

また, (a), (b) 及び (c) のうち任意の二つの概念の間には, 一般には, 本当に違いがあることにも注意しておく.

今までに 2 種類の誘導表現 $L^2\text{-Ind}(\ast)$ 及び $C^\infty\text{-Ind}(\ast)$ が登場したが, 以下単に $\text{Ind}(\ast)$ と書けば, この二つのうち任意の一方を指すことにする.

1.2. $G = \text{SL}_2$ に対する表現の WM. Jacquet-Langlands ([6]) は, $G = \text{GL}_2(\mathbb{F})$ (\mathbb{F} は局所体) の場合に, 保型形式の理論と関連して, 表現の WM の研究に着手した. 一方, Gelfand-Graev ([2]) は, G の既約表現が いかなる (N, ξ) に対して WM を持つかを知ることによって 既約表現の有用かつ簡便な分類を手える事を目指し, $G = \text{SL}_2(\mathbb{F}_q)$ (\mathbb{F}_q は有限体) に対して分類を手えた. 上のいずれの場合にも, 重要な役割を果たしたのは, 極大中単部分群 N の自明でない unitary 指標からの誘導表現であった.

我々は, $G = \text{SL}_2(\mathbb{R})$ の場合にこの事情を説明しよう. 極大中単部分群 $N = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; x \in \mathbb{R} \right\} \subseteq G$ ととり, $\xi_+ \left(\begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right) = e^{-\sqrt{1}x}$ ($x \in \mathbb{R}$) なる N の unitary 指標 ξ_+ を考える. この時, N の任意の unitary 指標 $\xi \neq 1$ からの誘導表現 $\text{Ind}_N^G(\xi)$ は, $\pi(\xi_+) =$

$\text{Ind}_N^G(\xi_+)$, $\pi(\xi_-) = \text{Ind}_N^G(\xi_-)$ ($\xi_- = \overline{\xi_+}$) のいずれか一方に同値な表現になる.

定理 1.1 ($G = \text{SL}_2(\mathbb{R})$). (1) G の任意の既約 unitary 表現 U に対して, smooth な表現 U_∞ の (N, ξ_\pm) 型 C^∞ -WM は 高々一意である. 即ち, $\dim \text{Hom}_G(U_\infty, C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_\pm)) \leq 1$ が成立つ.

(2) (unitary とは限らない) 主系列表現 π_P に対し,

$$\dim \text{Hom}_G((\pi_P)_\infty, C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_\pm)) = 1$$

が成立つ. 従って, π_P が既約なときには, $(\pi_P)_\infty$ は (N, ξ_+) 型および (N, ξ_-) 型 C^∞ -WM をそれぞれ一意にもつ.

(3) G の任意の正則 (resp. 反正則) 疎系列表現 D^+ (resp. D^-) は, (N, ξ_+) (resp. (N, ξ_-)) 型 L^2 -WM を一意的にもつ.

(4) D^+ (resp. D^-) は, (N, ξ_-) (resp. (N, ξ_+)) 型 L^2 -WM を持たないが, (N, ξ_-) (resp. (N, ξ_+)) 型 (\mathfrak{g}, K) -WM を一意にもつ.

注意. (1) 半単純 1) - 群の表現の WM について 現在までに得られている結果 (cf. [5], [9], [13]) 及び本稿の定理 5.4 を, $G = \text{SL}_2(\mathbb{R})$ の場合に翻訳したものが, 上記定理 1.1 である. [6] において この定理の主張がそのまま述べられている訳ではない.

(2) (N, ξ_\pm) 型 C^∞ -WM の一意性 (定理 1.1 (1)) は, (\mathfrak{g}, K) -WM まで考慮に入れると, 主系列表現に対して成立しなくなる.

定理 1.1 より, $G=SL_2(\mathbb{R})$ の場合には WM の概念を用いて, 主系列, 正則疎系列 及び 反正則疎系列 の 3 系列の表現は, 各々区別されたことになる.

1.3. Gelfand-Graev 表現. SL_2 とは限らない一般の半単純群 G に対して 表現の WM を研究しようとする際に, まず問題となるのは, “いかなる (N, ξ) に対する WM を考えるとよろしいか” という事である. $G=SL_2$ の場合の自然な一般化として, G の極大巾単部分群 N_{max} の “非退化” な unitary 指標 ξ_{nd} に関する WM の研究が, Kostant をはじめ 様々な人により行われてきた. ここで, N_{max} の 1 次元表現 ξ が 非退化 であるとは, ξ が次の条件を満す事である: 任意の $w \in W$ に対して, $\xi|(N_{max} \cap w^* N_{max} w^{-1}) \neq 1$. ただし, $G=KA_p N_{max}$ を G の岩沢分解としたとき, W は (G, A_p) の Weyl 群であり, $w \in W$ に対して w^* は w の $N_K(A_p)$ (正規化群) における 1 つの代表元を表す.

誘導表現 $\text{Ind}_{N_{max}}^G(\xi_{nd})$ は Gelfand-Graev 表現 (= GGR) と呼ばれ, 種々の文献 (例えば [3], [9]) では, 単に Whittaker model と言えは 本稿でいう (N_{max}, ξ_{nd}) 型 WM を指すことが多い. $G=SL_2(\mathbb{R})$ に関する 定理 1.1 の主張 (1) 及び (2) は, GGR に対して次の如く拡張された.

定理 1.2 ([9], [13]). G は, 線型かつ quasi-split な 連結半単純リ-群とする. このとき,

(1) C^∞ に誘導された GGR $C^\infty\text{-Ind}_{N_{\max}}^G(\xi_{nd})$ は smooth な表現として重複度 1 である. 即ち, G の任意の既約 unitary 表現 U に対して, $\dim \text{Hom}_G(U_\infty, C^\infty\text{-Ind}_{N_{\max}}^G(\xi_{nd})) \leq 1$ が成立つ.

(2) (極小放物型部分群から誘導された, 必ずしも unitary とは限らない) 任意の主系列表現 π_P に対し, 次の事が成立つ.

$$\dim \text{Hom}_G((\pi_P)_\infty, C^\infty\text{-Ind}_{N_{\max}}^G(\xi_{nd})) = 1.$$

また, Kostant ([9]) は, 定理 1.2 の設定を満す G に対し, (N_{\max}, ξ_{nd}) 型 WM の存在と, 既約表現から決まる原始イデアルの極小性とを関連づけた. 更に彼は, 主系列表現に対応する Harish-Chandra 加群の代数的双対空間のなかの "Whittaker vector" からなる部分空間の構造を解明した. これをき, かけに, 主系列表現の (N_{\max}, ξ_{nd}) 型 (\mathfrak{g}, K) -WM の研究が進展した (cf. [3], [10]).

さて, 定理 1.1 の (3) 及び (4) は GGR に対して如何に一般化されるだろうか. 正則 (または 反正則) 疎系列表現が GGR に関する WM を持つかという問題に対しては, $G = \text{SL}_2(\mathbb{R})$ の場合を除いて 否定的解答が与えられた ([5]). これを説明するために, 記号を少し導入する.

いま, G は線型かつ単純で, Riemann対称空間 G/K は Hermite 対称空間と仮定する. $\mathfrak{g} = \mathfrak{k} \oplus \mathfrak{p}$, $\mathfrak{k} = \text{Lie}(K)$, を \mathfrak{g} の Cartan 分解とし, G/K 上の G -不変複素構造から自然に定まる \mathfrak{p} 上の $\text{Ad}(K)$ -不変複素構造を J で表す. $\mathfrak{p}_{\pm} = \{X \in \mathfrak{p}_{\mathbb{C}}; JX = \pm \sqrt{-1}X\}$ (複号同順) とおく. \mathfrak{g} は compact Cartan 部分環 $\mathfrak{t} \subseteq \mathfrak{k}$ を持つことが知られている. $(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}}, \mathfrak{t}_{\mathbb{C}})$ の root 系 Σ の positive system Σ^+ を, $\mathfrak{p}_{\pm} \subseteq \sum_{\gamma \in \Sigma^+} (\mathfrak{g}_{\mathbb{C}})_{\gamma}$ ($(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}})_{\gamma}$ は γ の root 空間) となる様にえらんでおく. さて, Λ を K -dominant かつ integral (cf. p. 17) な $\mathfrak{t}_{\mathbb{C}}$ 上の線型形式とする. この時, Λ を Σ^+ に関する highest weight にもつ G の既約 admissible 表現 π_{Λ} が, 対応する Harish-Chandra 加群の同型を除いて一意的存在する. π_{Λ} たちは, 正則疎系列表現と呼ばれる G の自乗可積分表現をすべて含んでいる.

定理 1.3 ([5, Cor. 3.2]). 上述の記号のもとで, $\mathfrak{g} \neq \mathfrak{sl}_2(\mathbb{R})$ とする. この時, $I_{\Lambda} = (\pi_{\Lambda})_K$ は $(N_{\max}, \xi_{\text{nd}})$ 型 WM をもたない. 従って, π_{Λ} (resp. $(\pi_{\Lambda})_{\infty}$) は $(N_{\max}, \xi_{\text{nd}})$ 型の L^2 -WM (resp. C^{∞} -WM) をもち得ない.

結局, GGR は 主系列表現の model を与えるのには適するが, 正則 (又は 反正則) 疎系列表現の model としては不適である事が判った.

1.4. Generalized Gelfand-Graev 表現 (= GGGR). では, いかなる (N, ξ) に対して 表現 π_{Λ} 達は WM をもつのか? 再び $G =$

$SL_2(\mathbb{R})$ の場合に戻って考え直そう。中単部分群 $N = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; x \in \mathbb{R} \right\}$ は Siegel 領域 $G/k (\approx \mathbb{C}$ の上半平面) の \check{S} ilov 境界 (\approx 実軸) と標準的に微分同型な群である点に着目しよう。すると、 G/k が Hermite 対称空間なる任意の単純群 G に対しても、同様に、 G/k の \check{S} ilov 境界と自然に微分同型な高々 2-step の中単部分群 $N (\subseteq N_{\max})$ と N の既約 unitary 表現 ξ_+ が、 $SL_2(\mathbb{R})$ の場合の自然な拡張として定義できる (詳細は 2.2 参照)。

本稿では、誘導表現 $\text{Ind}_N^G(\xi_+)$ を GGGR と呼ぶことにする。

注意 (1) 任意の連結半単純リー群 (又は色々な体上の半単純代数群) G に対し、 \mathfrak{g} の各中零 $\text{Ad}(G)$ -軌道 $\mathcal{O} \subseteq \mathfrak{g}$ に対応する GGGR $\Gamma_{\mathcal{O}}$ が、中単部分群の既約 unitary 表現からの誘導表現として定義されている ([8])。正則中零軌道 \mathcal{O}_r に対応する GGGR $\Gamma_{\mathcal{O}_r}$ が 1.3 で述べた GGR である。上の誘導表現 $\text{Ind}_N^G(\xi_+)$ は GGGR $\Gamma_{\text{Ad}(G)A}$ (A は 2.2 で定義される中零元) に他ならない。

(2) GGR の場合とは異なり、GGGR $\Gamma_{\mathcal{O}}$ は一般には重複度有限ですらない。この事実から引き起こされる困難を回避するため、我々は [15] 及び [16] において各 GGGR $\Gamma_{\mathcal{O}}$ に対し “reduced GGGR (= RGGGR)” と呼ぶ誘導表現たちを定義し、いかなる場合に RGGGR が重複度有限に、更には重複度 1 になるかを論じた。それによれば、 $\text{GGGR } \Gamma_{\text{Ad}(G)A} = \text{Ind}_N^G(\xi_+)$ から定

まる RGGGR はみな重複度有限であり, 特別な場合には重複度 1 になる. また, $GGGR \text{ Ind}_N^G(\xi_+)$ に関して本稿でのべる主張を RGGGR に関する主張に言い換えることは容易である.

1.5. Highest weight をもつ表現の WM. 本論説の主目的は, highest weight をもつ G の既約表現 π_λ の $GGGR \text{ Ind}_N^G(\xi_+)$ の中の表現としてのうめこみについて論ずる事にある. この方向の研究としては [5], また直接関係のある研究として [12] がある. 我々はこれらの論文の結果と本論説との関係を明らかにしておく.

Rossi-Vergne ([12]) は, π_λ 達のうち正則疎系列表現 D_λ の岩沢部分群 $S = A_p N_{\max}$ への制限を明らかにした.

定理 1.4 ([12]). 誘導表現 $L^2\text{-Ind}_N^S(\xi_+)$ は S の既約 unitary 表現であり, 正則疎系列表現 D_λ は, S に制限すると $L^2\text{-Ind}_N^S(\xi_+)$ の $\dim \tau_\lambda$ 回の multiple に unitary 同値である. ここで, τ_λ は λ を highest weight にもつ K の有限次元既約 unitary 表現である.

更に, 彼らは表現 $L^2\text{-Ind}_N^S(\xi_+)$ は S の左正則表現の部分表現として実現できる事も示した. この事実と定理 1.4 より, D_λ の (N, ξ_+) 型 WM について次の命題が帰結される.

命題 1.5. (1) $\dim \text{Hom}_G((D_\Lambda)_\infty, C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_+)) \geq \dim \tau_\Lambda$. すなわち, C^∞ に誘導された GGGR $C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ における $(D_\Lambda)_\infty$ の重複度は $\dim \tau_\Lambda$ 以上である.

(2) unitary に誘導された GGGR $L^2\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ は G の左正則表現の部分表現である. 従って, $L^2\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ の部分表現として実現出来る G の既約 unitary 表現は 疎系列 (= 自乗可積分) 表現に限る.

一方, M. Hashizume ([5]) は, C^∞ に誘導された表現 $C^\infty\text{-Ind}_{N_{\max}}^G(\xi)$, $\xi = L^2\text{-Ind}_{N_{\max}}^G(\xi_+)$, を主に考え, Λ を highest weight にもつ K -有限な vector $F \in C^\infty(G; \xi)$ を, K -dominant かつ integral な 任意の線型形式 $\lambda \in \mathfrak{t}_\mathbb{C}^*$ に対し計算し, それをもとに π_λ の WM を論じた. ただ, その結果の中には, 命題 1.5 (1) の主張と相反する誤りも含まれているので注意を要する (ただし, $\dim \tau_\Lambda = 1$ なる Λ に対しては支障はない).

そこで, 我々は次の3つの問題を設定する.

問題 A. C^∞ に誘導された GGGR $C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ に関して K -有限であり かつ Λ を highest weight にもつ vector $F \in C^\infty(G; \xi_+)$ を全て決定せよ. 即ち, 我々の状況において [5] の結果を修正せよ.

問題 B. 問題 A で求めた highest weight vector が unitary に誘

導された GGGR $L^2\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ の表現空間に属するための λ に関する条件を, 命題 1.5(2) を用いずに, highest weight vector の L^2 -norm を計算することにより求めよ.

問題 C. 問題 A 及び B に対する結果を用いて, highest weight をもつ既約表現 π_λ の (N, ξ_+) 型 WM を決定せよ.

これらの 3 問題に対する我々の解答の要約は, §0 ですでに述べた. 問題 B に対する我々の考察は Rossi-Vergne ([2]) の (結果ではなく) 議論に立脚しており, この意味では, 彼らの仕事を別の角度から見直したものだといえよう. この様に, 本稿は完全に original な結果の報告というより, 寧ろ, [5] 及び [12] を土台にした highest weight をもつ表現の WM についての一考究と呼ぶのがふさわしいと思う. しかしながら, Rossi-Vergne の仕事と疎系列表現の WM とを 直接結びつけて論じた文献 を筆者はまだ見たことがなく, この点を整理しておくことが我々の今後の研究にとって必要と思われるので, この機会に報告することにした.

本論. GGGR $\text{Ind}_N^G(\xi_+)$ に関する highest weight vector

§2. GGGR $\text{Ind}_N^G(\xi_+)$. この節では, 本稿で問題にする GGGR の正確な定義を述べる. そのために, まず Hermite 対称空間 G/K

を与える単純群 G とそのリー環に関して、記号を用意する。

2.1. 準備. p. 9 で定義された記号 $\mathfrak{k}, \mathfrak{p}, \mathfrak{p}_{\pm}, \mathfrak{t}, \Sigma, \Sigma^+, J, \dots$ を、断りなしに用いる。 $(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}}, \mathfrak{t}_{\mathbb{C}})$ の各 root $\alpha \in \Sigma$ に対して、 $(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}})_{\alpha} \subseteq \mathfrak{k}_{\mathbb{C}}$ 又は $(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}})_{\alpha} \subseteq \mathfrak{p}_{\mathbb{C}}$ のいずれか一方のみが成立つ。前者が成立つとき α は compact root と呼ばれ、後者の場合には non-compact root と呼ばれる。 compact (resp. non-compact) root 全体を $\Sigma_{\mathfrak{k}}^+$ (resp. $\Sigma_{\mathfrak{p}}^+$) で表し、 $\Sigma_{\mathfrak{k}}^+ = \Sigma^+ \cap \Sigma_{\mathfrak{k}}$ (resp. $\Sigma_{\mathfrak{p}}^+ = \Sigma^+ \cap \Sigma_{\mathfrak{p}}$) とおく。各 $\alpha \in \Sigma$ に対し、 root vector $X_{\alpha} \in (\mathfrak{g}_{\mathbb{C}})_{\alpha}$ を次を満たす様にとる。

$$X_{\alpha} - X_{-\alpha}, \sqrt{1}(X_{\alpha} + X_{-\alpha}) \in \mathfrak{k} + \sqrt{1}\mathfrak{p}, \quad [X_{\alpha}, X_{-\alpha}] = H'_{\alpha}.$$

ここで、 H'_{α} は $\mathfrak{g}_{\mathbb{C}}$ の Killing 形式を通して $\frac{2\alpha}{\langle \alpha, \alpha \rangle}$ に対応する $\sqrt{1}\mathfrak{t}$ の元。

正の non-compact root のなす列 $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k)$ を次の如く定義する。 Σ^+ を positive system として与える様な $\sqrt{1}\mathfrak{t}^*$ 上の線型順序を 1 つ固定しておく。まず、この順序に関する最大の non-compact root $\tilde{\gamma}_1$ をとる。次に、 $\tilde{\gamma}_m (m < k)$ が定義されているとして、各 $\tilde{\gamma}_m (m < k)$ と強直交する正の non-compact root のうち最大のものを $\tilde{\gamma}_k$ とする。ここで、2つの root α, β が強直交するとは、 $\alpha \neq \pm\beta$ かつ $\alpha \pm \beta \notin \Sigma$ なることである。上の手続きを可能な限り繰り返して得られる root の列を $(\tilde{\gamma}_1, \tilde{\gamma}_2, \dots, \tilde{\gamma}_l)$ とする。このとき、 $\gamma_k = \tilde{\gamma}_{l+1-k} (1 \leq k \leq l)$ とおく。

さて、 $\alpha_{\mathfrak{p}} = \sum_{k=1}^l \oplus \mathbb{R}H_k$, $H_k = X_{\gamma_k} + X_{-\gamma_k}$, とおくと、 $\alpha_{\mathfrak{p}}$ は \mathfrak{p} の極大可換部分空間になる。また、 $\mu = \text{Ad} \left(\exp \left\{ \frac{\pi}{4} \sum_{k=1}^l (X_{\gamma_k} - X_{-\gamma_k}) \right\} \right)$

(Cayley 変換) は, $H_k \in \mathfrak{a}_p$ を $H'_k \in \sqrt{-1}\mathfrak{t}$ にうつす. いま, $\lambda_k = \delta_k \circ \mu | \mathfrak{a}_p$ ($1 \leq k \leq l$) とおくと, $(\lambda_k)_{k=1}^l$ は \mathfrak{a}_p の双対空間 \mathfrak{a}_p^* の基底であり, $(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}_p)$ の root 系 R は次のいずれかになる (restricted root theorem, [11]).

$$\text{(Case I)} \quad R = \left\{ \pm \frac{1}{2}(\lambda_k - \lambda_m); k > m \right\} \cup \left\{ \pm \frac{1}{2}(\lambda_k + \lambda_m); k \geq m \right\},$$

$$\text{(Case II)} \quad R = \left\{ \pm \frac{1}{2}(\lambda_k - \lambda_m); k > m \right\} \cup \left\{ \pm \frac{1}{2}\lambda_k; k \right\} \cup \left\{ \pm \frac{1}{2}(\lambda_k + \lambda_m); k \geq m \right\}.$$

(Case I) は, ちょうど, G/K が管領域と解析同型となる場合である. いま, $R^+ = \left\{ \frac{1}{2}(\lambda_k - \lambda_m); k > m \right\} \cup \left\{ \frac{1}{2}(\lambda_k + \lambda_m); k \geq m \right\} \left(\cup \left\{ \frac{1}{2}\lambda_k; k \right\} \right)$ とおくと, R^+ は R の positive system を定め, また Cayley 変換 μ により Σ^+ に対応する. 即ち, $R^+ \cup \{0\} = \Sigma^+ \circ \mu | \mathfrak{a}_p$ が成立つ.

$A_p = \exp \mathfrak{a}_p$ とおく. また, $\pi_{\max} = \sum_{\lambda \in R^+} \mathfrak{g}_\lambda$ (\mathfrak{g}_λ は λ の root 空間) に対応する G の解析的部分群を N_{\max} で表す. N_{\max} は G の極大巾単部分群であり, $G = KA_p N_{\max}$ (岩沢分解) が成立つ. 半単純元 $H_0 = \sum_{k=1}^l H_k \in \mathfrak{a}_p$ に対して, \mathfrak{g} 上の作用素 $\text{ad } H_0$ に関する固有値 i ($i \in \mathbb{Z}$) の固有空間を $\mathfrak{g}(i)$ で表すと, \mathfrak{g} は

$$\mathfrak{g} = \bigoplus_{|i| \leq 2, i \in \mathbb{Z}} \mathfrak{g}(i), \quad \theta \mathfrak{g}(i) = \mathfrak{g}(-i), \quad \mathfrak{g}(2) = \sum_{k \geq m} \mathfrak{g}_{\frac{1}{2}(\lambda_k + \lambda_m)},$$

$$\mathfrak{g}(1) = \sum_k \mathfrak{g}_{\frac{1}{2}\lambda_k}, \quad \mathfrak{g}(0) = \mathfrak{g}(\mathfrak{a}_p) \oplus \sum_{k \neq m} \mathfrak{g}_{\frac{1}{2}(\lambda_k + \lambda_m)},$$

と固有空間分解される. ここで, θ は Cartan 分解 $\mathfrak{g} = \mathfrak{k} \oplus \mathfrak{p}$ に対応する Cartan 対合である. いま, $\pi = \mathfrak{g}(1) \oplus \mathfrak{g}(2)$, $\pi_0 = \mathfrak{g}(0) \cap \pi_{\max}$ に対応する G の解析的部分群を各々 N , N_0 で表すと, $N_{\max} = N_0 \times N$ (半直積) が成立つ. また, N は Siegel 領域 G/K の

\checkmark Silov 境界と標準的に微分同型な高々 2 step の中零リ-群であり, N が可換になるのはちょうど (Case I) のときである.

2.2. 既約 unitary 表現 ξ_+ とその実現. $1 \leq k \leq l$ に対して,

$E_k = \frac{\sqrt{1}}{2} (H'_{\lambda_k} - (X_{\lambda_k} - X_{-\lambda_k}))$ とおくと, $E_k \in \mathfrak{g}_{\lambda_k}$ である. いま, 中零元 $A = \sum_{k=1}^l E_k \in \mathfrak{g}(2) \subseteq \pi$ に対し, π 上の線型形式 η' を $\eta'(X) = B(X, \theta A)$ ($X \in \pi$) により定める. ここに B は \mathfrak{g} の Killing 形式. $\pi^* \ni \eta'$ を通る N の余随伴軌道 ($\subseteq \pi^*$) に Kirillov の方法により対応する N の既約 unitary 表現 (の同値類) を ξ_+ で表す. (Case I) においては, N は可換だから ξ_+ は unitary 指標 $e^{\sqrt{1}\eta'}$ に他ならない. (Case II) においては, ξ_+ は無限次元表現になる.

§3 以降で行う計算のために ξ_+ の具体的な実現を手えておく (cf. [12]) 線型空間の同型 $\mathfrak{g} = \mathfrak{a}_{\mathfrak{p}} \oplus \mathfrak{n}_{\max} \xrightarrow{\sim} \mathfrak{p}$, $\pi(X) = \frac{1}{2}(X - \theta X)$, を用いて \mathfrak{p} 上の複素構造 J を \mathfrak{g} 上に移したものを $J' = \pi' \circ J \circ \pi$ で表す. この時, $J' \mathfrak{g}(1) = \mathfrak{g}(1)$ が成立つ. 従って, $j' = J' |_{\mathfrak{g}(1)}$ は $\mathfrak{g}(1)$ に複素線型空間の構造を与える. また, $\mathfrak{g}^{\pm}(1) = \{U \mp \sqrt{1} j' U; U \in \mathfrak{g}(1)\}$ (複号同順) は, $j' \in \mathfrak{g}(1)_{\mathbb{C}}$ 上の \mathbb{C} -線型写像に拡張したときの固有値 $\pm \sqrt{1}$ の固有空間である. いま,

$$\langle U, U' \rangle = -\frac{1}{4} \{ \eta'([j'U, U']) + \sqrt{1} \eta'([U, U']) \} \quad (U, U' \in \mathfrak{g}(1))$$

とおくと, \langle, \rangle は複素線型空間 $(\mathfrak{g}(1), j')$ 上の正定値 Hermitian 内積を定める. このことから, $\pi_{\mathbb{C}}$ の部分環 $\mathfrak{g}(1) \oplus \mathfrak{g}(2)_{\mathbb{C}}$ は η' における正の polarization ([12, Def. 3.17] 参照) である事が判

る。従って, ξ_+ は 可換部分群 $\exp \mathfrak{g}(2) \subseteq N$ の unitary 指標 $\exp(\sqrt{-1}\eta'|\mathfrak{g}(2))$ からの $N \wedge$ の “holomorphic induction” により実現できる。この実現は, さらに次の形に書き換えられる:

$\mathcal{H}(\xi_+) = \{ \psi; (\mathfrak{g}(1), j') \text{ 上の整函数, } \|\psi\|^2 = \int_{\mathfrak{g}(1)} |\psi(U)|^2 e^{-2\langle U, U \rangle} dU < +\infty \}$
とおく。ここに dU は $\mathfrak{g}(1)$ 上の Euclid 測度。群 N は,

$$(\xi_+(n)\psi)(U) = \exp\{2\langle U, U_0 \rangle - \langle U_0, U_0 \rangle + \sqrt{-1}\eta'(V_0)\} \psi(U - U_0),$$

$$n = \exp(U_0 + V_0) \in N, \quad U_0, U \in \mathfrak{g}(1), \quad V_0 \in \mathfrak{g}(2), \quad \psi \in \mathcal{H}(\xi_+),$$

により Hilbert 空間 $\mathcal{H}(\xi_+)$ 上に unitary に作用する。

2.3. GGGR $\text{Ind}_N^G(\xi_+)$. 本稿では, 誘導表現 $\text{Ind}_N^G(\xi_+)$ を Generalized Gelfand-Graev 表現 (= GGGR) と呼ぶ。これは, $G = \text{SL}_2(\mathbb{R})$ の場合に 1.2 で定義された表現 $\pi(\xi_+)$ の自然な一般化である。

§3. GGGR $C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ に関する highest weight vector の決定

この節では, 1.5 で設定した問題 A に対する解答を述べる。

3.1 Highest weight vector の空間 $C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \Lambda)$. いま, K -dominant

かつ integral な $\mathfrak{t}_\mathbb{C}$ 上の線型形式のなす集合を Ξ_k^+ で表す。即ち, $\Lambda \in \Xi_k^+$ とは $\Lambda \in \mathfrak{t}_\mathbb{C}^*$ が次の 2 条件を満すことである。

$$(3.1) \quad \Lambda(H'_\gamma) \geq 0, \quad \forall \gamma \in \Sigma_k^+,$$

(3.2) $\exp H \mapsto \exp \Lambda(H)$ ($H \in \mathfrak{t}$) は K の極大輪環部分群 $T = \exp \mathfrak{t}$ の unitary 指標を定める。

さて, $\Lambda \in \Xi_k^+$ とする。次の 2 条件 (3.3) 及び (3.4) を満す

K -有限次元 \mathfrak{g} 上の $C^\infty(G; \xi_+)$ のなす空間を $C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \Lambda)$ で表す。ここで、 $(\pi_{\xi_+}, C^\infty(G; \xi_+)) = C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ (cf. 1.1).

$$(3.3) \quad \pi_{\xi_+}(H)F = \Lambda(H)F, \quad \forall H \in \mathfrak{h},$$

$$(3.4) \quad \pi_{\xi_+}(X_\gamma)F = 0, \quad \forall \gamma \in \Sigma^+.$$

我々は highest weight vector $F \in C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \Lambda)$ を具体的に求める。

Λ を (Σ^+) に関する highest weight にもつ K の有限次元既約表現を $(\tau_\Lambda, V_\Lambda)$, その反傾表現を $(\tau_\Lambda^*, V_\Lambda^*)$ で表す。 $V_\Lambda^* \otimes \mathcal{H}(\xi_+)$ に値をとる G 上の C^∞ -函数 \tilde{F} で、次の 2 条件

$$(3.5) \quad \tilde{F}(kgk^{-1}) = [\tau_\Lambda^*(k) \otimes \xi_+(n)] \tilde{F}(g) \quad (g \in G, k \in K, n \in \mathbb{N}),$$

$$(3.6) \quad X_\gamma \tilde{F} = 0, \quad \forall \gamma \in \Sigma_p^+,$$

を満すもの全体のなす空間を $C^\infty(G; \tau_\Lambda^*, \xi_+ \parallel \Sigma_p^+; \Lambda)$ で表す。

ここで、 $\mathfrak{g}_\mathbb{C}$ の展開環 $U(\mathfrak{g}_\mathbb{C})$ の各元は G 上の右不変微分作用素として G 上の C^∞ -函数に作用するものとする。

表現 τ_Λ の Λ -highest weight vector $v_\Lambda \in V_\Lambda \setminus \{0\}$ をとる。 $\tilde{F} \in C^\infty(G; \tau_\Lambda^*, \xi_+ \parallel \Sigma_p^+; \Lambda)$ に対して、

$$(3.7) \quad F(g) = \langle v_\Lambda, \tilde{F}(g) \rangle \quad (g \in G)$$

とおく。ここで、 \langle, \rangle は V_Λ と V_Λ^* の間の双対性を表す内積から自然に定まる $V_\Lambda \times (V_\Lambda^* \otimes \mathcal{H}(\xi_+))$ から $\mathcal{H}(\xi_+)$ への双線型写像を表す。この時、明らかに $F \in C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \Lambda)$ 。更に、

補題 3.1. 対応 $\tilde{F} \mapsto F$ は $C^\infty(G; \tau_\Lambda^*, \xi_+ \parallel \Sigma_p^+; \Lambda)$ から

$C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \Lambda)$ の上への線型空間としての同型写像を与える。

この補題により、問題 A は “ $\tilde{F} \in C^\infty(G; \tau_\Lambda^*, \xi_+ \parallel \Sigma_p^+; \Lambda)$ を全て求めよ” という問題と同値になった。

\tilde{F} は G 上の $V_\Lambda^* \otimes \mathcal{H}(\xi_+)$ に値をもつ C^∞ -函数であり、 $\mathcal{H}(\xi_+)$ は $(\mathfrak{g}(1), j')$ 上の整函数からなる訳だから、 \tilde{F} を $G \times \mathfrak{g}(1)$ 上の V_Λ^* に値をもつ C^∞ -函数 $G \times \mathfrak{g}(1) \ni (g, U) \mapsto \tilde{F}(g: U) \in V_\Lambda^*$ と自然に見なすことが出来る。このとき、 $\tilde{F} \in C^\infty(G; \tau_\Lambda^*, \xi_+ \parallel \Sigma_p^+; \Lambda)$ の満たすべき条件は次の 3 条件 (3.8), (3.9) 及び (3.10) になる。

(3.8) 任意の $g \in G$ に対し、 $\tilde{F}(g: \cdot) \in V_\Lambda^* \otimes \mathcal{H}(\xi_+)$ 。さらに、 G 上の函数 $G \ni g \mapsto \tilde{F}(g: \cdot) \in V_\Lambda^* \otimes \mathcal{H}(\xi_+)$ は C^∞ -函数。

$$(3.9) \quad \tilde{F}(k g \pi^1: U) = \exp\{2\langle U, U_0 \rangle - \langle U_0, U_0 \rangle + \text{tr} \eta'(V_0)\} \tau_\Lambda^*(k) \tilde{F}(g: U - U_0),$$

$$\forall g \in G, \forall k \in K, \forall \pi = \exp(U_0 + V_0), \forall U, U_0 \in \mathfrak{g}(1), \forall V_0 \in \mathfrak{g}(2).$$

$$(3.10) \quad X_\gamma \tilde{F}_U = 0, \quad \forall \gamma \in \Sigma_p^+, \forall U \in \mathfrak{g}(1).$$

ここで、 $\tilde{F}_U(g) = \tilde{F}(g: U)$ 。

さて、次の手順で \tilde{F} を決定しよう。まず、条件 (3.9) により \tilde{F} はその $A_p N_0 \times \mathfrak{g}(1)$ 上への制限 \tilde{F}_0 により一意的に定まることに注意する。次に、微分方程式系 (3.10) を \tilde{F}_0 に関するものに書き換えて解く。最後に、求めた解 \tilde{F}_0 から条件 (3.9) を通して定まる \tilde{F} が条件 (3.8) を満たす事を検証する。

注意. [5, p.65] においては, (\tilde{F} ではなく) $F \in C^\infty(G/\mathfrak{z}_+ \parallel \Sigma^+; \Lambda)$ に対して, その $A_p N_0 \times \mathfrak{g}(1)$ への制限 F_0 により F は一意的に決定される, と主張してある. しかし, この主張は $\dim \tau_\lambda > 1$ の時には正しくない. この部分を修正した我々の計算は, [5] の計算よりもかなり煩雑になる.

3.2. 問題 A に対する解答. 結果を述べるために記号を導入する. G は線型リ-群であるから複素化 $G_{\mathbb{C}} \ni G$ をもつ. $\mathfrak{k}_{\mathbb{C}}$ に対応する $G_{\mathbb{C}}$ の解析的部分群を $K_{\mathbb{C}}$ で表し, τ_λ^* を $K_{\mathbb{C}}$ の複素解析的表現に拡張しておく. いま, $\alpha = \mu \circ \theta$ (cf. 2.1) とおく. すると, α を, $G_{\mathbb{C}}$ の可解部分群 $A_p N_0 \exp \mathfrak{g}^+(1)$ から $K_{\mathbb{C}}$ の中への群同型に持ち上げることができる ($\mathfrak{g}^+(1)$ については 2.2 参照). これもまた同じ α で表す. $U \in \mathfrak{g}(1)$ に対し, $p(U) = \frac{1}{2\sqrt{2}}(U - F_1 j' U) \in \mathfrak{g}^+(1)$ とおく. この時, $\mathfrak{g}(1) \ni U \mapsto (\tau_\lambda^* \circ \alpha)(\exp p(U)) \in GL(V_\lambda^*)$ は複素線型空間 $(\mathfrak{g}(1), j')$ (cf. 2.2) 上の正則多項式写像になる. さて, $G \times \mathfrak{g}(1)$ 上の $GL(V_\lambda^*)$ に値をもつ函数 F_λ を次の如く定める: まず, $A_p N_0 \times \mathfrak{g}(1)$ 上では, $(a n_0, U) \in A_p N_0 \times \mathfrak{g}(1)$ に対し,

$$(3.11) \quad F_\lambda(a n_0; U) = \{ \exp \eta'(\text{Ad}(a n_0) A) \} (\tau_\lambda^* \circ \alpha)(a n_0 \exp p(U))$$

と定める. η' 及び A については 2.2 参照. 次に, F_λ に対し条件 (3.9) が成立つ様に, 上で定めた函数を $G \times \mathfrak{g}(1)$ 上に拡張する. $v^* \in V_\lambda^*$ に対して, $G \times \mathfrak{g}(1)$ 上の V_λ^* -値 (resp. \mathbb{C} -値) 函数 $\tilde{F}_\lambda^{v^*}$

(resp. $F_\lambda^{v^*}$) を,

$$(3.12) \quad \begin{aligned} \tilde{F}_\lambda^{v^*}(g:U) &= F_\lambda(g:U)v^* \\ F_\lambda^{v^*}(g:U) &= \langle v_\lambda, \tilde{F}_\lambda^{v^*}(g:U) \rangle \end{aligned} \quad (g,U) \in G \times \mathfrak{g}(U),$$

により定める。3.1 の最後の部分で述べた手順に従って $\tilde{F} \in C^\infty(G; \tau_\lambda^*, \xi_+ \parallel \Sigma_p^+; \Lambda)$ を求めた結果、次の命題を得る。

命題 3.2. $C^\infty(G; \tau_\lambda^*, \xi_+ \parallel \Sigma_p^+; \Lambda) = \{ \tilde{F}_\lambda^{v^*}; v^* \in V_\lambda^* \}.$

補題 3.1 と命題 3.2 より、問題 A (cf. 1.5) に対する解答が次の如く述べられる。

定理 3.3. 任意の $\Lambda \in \Xi_k^+$ に対し、対応 $v^* \mapsto F_\lambda^{v^*}$ は V_λ^* から highest weight vector のなす空間 $C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \Lambda)$ の上への (線型空間の) 同型写像を与える。即ち、 $C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \Lambda) \simeq V_\lambda^*$ 。

§4. GGGR $L^2\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ に関する highest weight vector の決定

この節では 1.5 で提起した問題 B を解く。

4.1. GGGR $L^2\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$. ξ_+ の表現空間 $\mathcal{H}(\xi_+)$ (cf. 2.2) に値をもつ G 上の (可測) 関数 F で、次の 2 条件

$$(4.1) \quad R_n F = \xi_+(n)^{-1} F, \quad \forall n \in N,$$

$$(4.2) \quad \|F\|_{L^2(G; \xi_+)}^2 = \int_{G/N} \|F(g)\|_{\mathcal{H}(\xi_+)}^2 d\mu(gN) < +\infty,$$

を満すもの全体から定まる Hilbert 空間を $L^2(G; \xi_+)$ で表す。
 ここで, $R_n F(g) = F(gn)$ ($g \in G$), $d\mu$ は商空間 G/N 上の G -
 不変測度である。 G は左移動によって $L^2(G; \xi_+)$ 上に unitary
 表現 U_{ξ_+} を定める。この表現 $(U_{\xi_+}, L^2(G; \xi_+))$ が unitary に
 誘導された GGR $L^2\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ である。

4.2. 問題 B に対する解答. ξ_3 で求めた highest weight
 vector $F_\lambda^{u^*} \in C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \lambda)$ が $L^2(G; \xi_+)$ に属するための (λ に関
 する)条件が次の如く与えられる。

定理 4.1. K -dominantかつ integral な線型形式 $\lambda \in \Xi_k^+$ に対し
 て, 次の 4 条件 (a)~(d) は互いに同値である。

- (a) ある $v^* \in V_\lambda^* \setminus \{0\}$ に対して, $F_\lambda^{u^*}$ が $L^2(G; \xi_+)$ に属する。
- (b) 任意の $v^* \in V_\lambda^*$ に対して, $F_\lambda^{u^*}$ が $L^2(G; \xi_+)$ に属する。
- (c) λ は条件 $(\lambda + \rho)(H_{\gamma_2}') < 0$ を満す。ここに, γ_2 は最大の
 non-compact root (cf. 2.1) であり, $\rho = \frac{1}{2} \sum_{\gamma \in \Sigma^+} \gamma$ とおいた。
- (d) 任意の $\gamma \in \Sigma_\rho^+$ に対して $(\lambda + \rho)(H_\gamma') < 0$ が成立つ。

注意. (1) 結局, $F_\lambda^{u^*} \in L^2(G; \xi_+)$ か否かは $v^* (\neq 0)$ の取り方には
 よらず, λ が条件 (c) (\Leftrightarrow (d)) を満すか否かによって決まる。

(2) λ に関する条件 (d) は, G の正則疎系列表現の non-vanishing
 条件 ([4]) に他ならない (命題 5.2 も参照)。また, 条件 (c) と

(d)の同値性は [12, Appendix] において証明されている。

4.3. 定理4.1の証明のあらすじ. ノルム $\|F_\lambda^{v^*}\|_{L^2(G; \xi_+)}$ がいつ有限になるかを調べる. $G=KA_pN_0N$ ゆえ, G/N 上の G -不変測度 $d\mu$ は, 自然に定まる微分同型 $G/N \approx KA_pN_0$ により G/N と KA_pN_0 とを同一視したとき, $d\mu = a^{2\rho'} dk da dn_0$ で与えられる. ここで, dk, da 及び dn_0 は 各々 K, A_p 及び N_0 の Haar 測度であり, $\rho' = \rho \circ \mu|_{\mathfrak{a}_p}$ とおいた. この事実と compact群 K の既約表現の行列要素に関する直交関係から, まず ノルム $\|F_\lambda^{v^*}\|_{L^2(G; \xi_+)}^2$ は,

$$(4.3) \quad \|F_\lambda^{v^*}\|^2 = d(\Lambda)^{-1} \int_{A_p N_0 \times \mathfrak{g}(1)} \left\{ \exp 2\eta'(\text{Ad}(a n_0^{-1})A) \right\} \|(\tau_\lambda^* \alpha)(a n_0 \exp p(U)) v^*\|^2 a^{2\rho'} e^{-2\|U\|^2} da dn_0 dU$$

と計算される. ここで, $d(\Lambda) = \dim \tau_\lambda$. 特に v^* が, τ_λ^* の Σ_k^+ に関して lowest な weight $-\lambda$ を weight にもつ vector $v_\lambda^* (\neq 0)$ の場合には, (4.3)の右辺は 次の様な簡単な形になる.

$$(4.4) \quad \|F_\lambda^{v^*}\|^2 = d(\Lambda)^{-1} \int_{\mathfrak{g}(1)} e^{-2\|U\|^2} dU \int_{A_p N_0} \left\{ \exp 2\eta'(\text{Ad}(a n_0^{-1})A) \right\} a^{2(\lambda+p)\rho'} da dn_0.$$

(4.4)の右辺を具体的に計算して, 次の補題を得る.

補題4.2. 定理4.1における条件(c) (\Leftrightarrow (d))は $F_\lambda^{v^*} \in L^2(G; \xi_+)$ なるために λ の満すべき必要十分条件である.

この補題より, $\dim \tau_\lambda = 1$ なる $\lambda \in \Sigma_k^+$ に限れば 定理4.1は

証明されたことになる。更に次の2つの補題を示す事によ、
て、定理4.1の証明は完結する。

補題4.3. ある $\nu^* \in V_\Lambda^* \setminus \{0\}$ に対して $F_\Lambda^{\nu^*} \in L^2(G; \xi_+)$ ならば、
必ず $F_\Lambda^{\nu^*} \in L^2(G; \xi_+)$ となる。

補題4.4. Λ が条件 $(1 + \rho)(H_\beta) < 0$, $\forall \beta \in \Sigma_p^+$, ε 満せば、積分

$$\int_{A_p N_0} \{ \exp 2\eta(\text{Ad}(a n_0)^{-1} A) \} \|(\tau_\Lambda^* \alpha)(a n_0)\|_{GL(V_\Lambda^*)}^2 a^{2\rho'} da dn_0$$
 は絶対収束する。従、て、このとき任意の $\nu^* \in V_\Lambda^*$ に対して $F_\Lambda^{\nu^*} \in L^2(G; \xi_+)$ が成立つ。

上の3つの補題は [12]における議論を用いて証明できる。

§5. Highest weight をもつ admissible 表現の WM. §3及び§4
 で得た結果をもとに、1.5で提起した問題Cに対する我々の解
 答を述べよう。その前に、5.1では highest weight をもつ admi-
 ssible 表現についての Harish-Chandra ([4])の結果を、Varadara-
 jan による解説([14])を参考にしてまとめておく。

5.1. $\Lambda \in \mathfrak{t}_\mathbb{C}^*$ とする。 $U(\mathfrak{g}_\mathbb{C})$ -加群 M が Λ を (Σ^+ -extreme)
 highest weight にもつ highest weight module であるとは、次の条件
 (5.1)-(5.3)を満す vector $v \neq 0, v \in M$ が存在するときをいう。

$$(5.1) \quad U(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}})v = M,$$

$$(5.2) \quad Hv = \lambda(H)v, \quad \forall H \in \mathfrak{t}_{\mathbb{C}},$$

$$(5.3) \quad X_{\gamma}v = 0, \quad \forall \gamma \in \Sigma^{+}.$$

次に, (\mathfrak{g}, K) -加群 V が admissible であるとは, 任意の $v \in V$ は K -有限 (i.e. $\dim U(\mathfrak{k}_{\mathbb{C}})v < +\infty$) であり, かつ K -加群として V が重複度有限になることである.

まず, $U(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}})$ の表現論における Verma module と同様に 基本的役割を果たす “universal” な, admissible highest weight module J_{λ} を定義する. $\lambda \in \mathfrak{t}_{\mathbb{C}}^{*}$ を highest weight にもつ $U(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}})$ -加群が同時に admissible (\mathfrak{g}, K) -加群の構造を持ち得るためには, $\lambda \in \Sigma_{\mathfrak{k}}^{+}$ (cf. p. 17) でなければならぬ. 従って, 以下 $\lambda \in \Sigma_{\mathfrak{k}}^{+}$ と仮定する.

いま, $\lambda \in \mathfrak{t}_{\mathbb{C}}^{*}$ を highest weight にもつ K の (従って $\mathfrak{k}_{\mathbb{C}}$ の) 既約表現 $(\tau_{\lambda}, V_{\lambda})$ を, $\mathfrak{g}_{\mathbb{C}}$ の 極大放物型部分環 $\mathfrak{g}_{+} = \mathfrak{k}_{\mathbb{C}} \oplus \mathfrak{p}_{+}$ (\mathfrak{p}_{+} については p. 9 参照) の表現 $(\tilde{\tau}_{\lambda}, V_{\lambda})$ に $\tilde{\tau}_{\lambda}(X+Y) = \tau_{\lambda}(X)$ ($X \in \mathfrak{k}_{\mathbb{C}}, Y \in \mathfrak{p}_{+}$) により拡張しておく. $\tilde{\tau}_{\lambda}$ により, V_{λ} は $U(\mathfrak{g}_{+})$ -加群になる. このとき, $J_{\lambda} = U(\mathfrak{g}_{\mathbb{C}}) \otimes_{U(\mathfrak{g}_{+})} V_{\lambda}$ とおく. τ_{λ} はもともと K の表現なので, J_{λ} は (\mathfrak{g}, K) -加群の構造をもつ. また, $U(\mathfrak{p}_{+})$ -加群として, J_{λ} は階数 $\dim V_{\lambda}$ の自由加群になる. さらに, J_{λ} は λ を highest weight にもつ admissible な highest weight module になることがわかる.

J_{λ} は 次の意味で “universal” である: $\lambda \in \mathfrak{t}_{\mathbb{C}}^{*}$ を highest weight にもつ任意の admissible highest weight module M は, J_{λ} の部分

(\mathfrak{g}, K) -加群による商と同型になる。即ち, J_λ から M の上への (\mathfrak{g}, K) -加群準同型写像が存在する。逆に, J_λ の任意の部分 (\mathfrak{g}, K) -加群 $V \subseteq J_\lambda$ による商 J_λ/V は, admissible な highest weight module になる。

上に述べた事より, $\lambda \in \text{highest weight}$ にもつ 既約 admissible (\mathfrak{g}, K) -加群とは, 極大部分 (\mathfrak{g}, K) -加群 $V \subseteq J_\lambda$ による J_λ の商 J_λ/V に他ならない。一方, J_λ は最大の部分 (\mathfrak{g}, K) -加群 $V_0 \subseteq J_\lambda$ を持つ事が知られている。従って, $\lambda \in \text{highest weight}$ にもつ admissible highest weight module のうちで既約なものは $I_\lambda = J_\lambda/V_0$ と (\mathfrak{g}, K) -加群として同型になる。

既約表現 I_λ が有限次元になるのは, $\lambda \in \Sigma_k^+$ がさらに Σ^+ に関して dominant になる場合である。この場合には, $I_\lambda \neq J_\lambda$ (i.e. $V_0 \neq (0)$)。なぜなら, いかなる $\lambda \in \Sigma_k^+$ に対しても J_λ は常に無限次元になるからである。しかし, その対極にあたる次の場合には, J_λ 自身が既約になる。

命題 5.1 ([14, Prop. 2.3.3]) $\lambda \in \Sigma_k^+$ が条件 $(\lambda + \rho)(H_\gamma) \notin \{1, 2, \dots\}$, $\forall \gamma \in \Sigma_p^+$, を満たせば, J_λ は既約になる。特に, λ が定理 4.1 における条件 (c) (\Leftrightarrow (d)) を満たすときには $I_\lambda = J_\lambda$ となる。

任意の既約 admissible (\mathfrak{g}, K) -加群 I に対し, $I \in \text{Harish-Chandra}$

加群としても G の既約 admissible 表現 π が存在する。 π として unitary 表現をとることができるとき、 I を unitarizable と呼ぶ。

命題 5.2 ([4, VI]). Λ が条件 $(\Lambda + \rho)(H'_\gamma) < 0, \forall \gamma \in \Sigma_p^+$, を満たすと仮定する。このとき、 $I_\Lambda (= J_\Lambda)$ は unitarizable であり、 G の自乗可積分な既約 unitary 表現 $(D_\Lambda, \mathcal{H}_\Lambda)$ の Harish-Chandra 加群になる。

D_Λ は K の既約 unitary 表現 τ_Λ から G_Λ の holomorphic induction により実現できる。このため、 D_Λ は 正則疎系列表現 と呼ばれている。

注意. 命題 5.2 の条件を満たさないいくつかの $\Lambda \in \Sigma_k^+$ に対しても、 I_Λ が unitarizable になる場合がある。 I_Λ が unitarizable になる Λ を決定する問題は、数年前に Enright-Howe-Wallach ([1]) 及び Jakobsen ([7]) により 各々独立に解決された。詳しくは原論文を参照されたい。

5.2. I_Λ の (N, ξ_+) 型 (\mathfrak{g}, K) -WM. まず、 universal な admissible highest weight module J_Λ から GGGR $\pi_{\xi_+} = C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ の中への (\mathfrak{g}, K) -加群準同型写像のなす空間 $\text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(J_\Lambda, \pi_{\xi_+})$ を解明する。

$\Lambda \in \Xi_k^+$ に対し、 J_Λ の highest weight vector $v_0 \neq 0$ とする。この時、任意の $T \in \text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(J_\Lambda, \pi_{\xi_+})$ に対し Tv_0 は $C^\infty(G; \xi_+)$ の K -有限な highest weight vector である。即ち、 $Tv_0 \in C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \Lambda)$ (cf. §3). 更に J_Λ の universality (cf. 5.1) を用いて、対応 $T \mapsto Tv_0$ は線型空間の同型

$$(5.4) \quad \text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(J_\Lambda, \pi_{\xi_+}) \simeq C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \Lambda)$$

を与えることが判る。これと §3 での主結果 (定理 3.3) を併せて、

$$(5.5) \quad \text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(J_\Lambda, \pi_{\xi_+}) \simeq V_\Lambda^*$$

を得る。

一方、 I_Λ は J_Λ の quotient なわけだから、

$$(5.6) \quad \text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(I_\Lambda, \pi_{\xi_+}) \hookrightarrow \text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(J_\Lambda, \pi_{\xi_+})$$

なる線型空間の自然なうめ込みがある。以上まとめて、

定理 5.3. 任意の $\Lambda \in \Xi_k^+$ に対し、

$$(5.7) \quad \text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(I_\Lambda, \pi_{\xi_+}) \hookrightarrow \text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(J_\Lambda, \pi_{\xi_+}) \simeq V_\Lambda^*$$

が成立つ。従って、既約かつ admissible な highest weight module I_Λ の $C^\infty(G; \xi_+)$ における重複度は $\dim V_\Lambda^*$ 以下である。 J_Λ が既約 ($\Leftrightarrow I_\Lambda = J_\Lambda$) なときにはその重複度は $\dim V_\Lambda^*$ に一致する。

注意. $\dim I_\Lambda < +\infty$ なる場合には、 $\text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(I_\Lambda, \pi_{\xi_+}) = (0)$ なる事が証明できる。従って、有限次元既約表現 I_Λ は、 (\mathfrak{g}, K) -加

群 $C^\infty(G; \xi_+)$ の subquotient としては実現可能だが、部分 (g, K) -加群としては実現できない。この事実は、もっと一般に $I_\lambda \neq J_\lambda$ なる任意の I_λ に対して正しい、と筆者は予想している ([3, Cor.3.4] と比較されたい)。しかし、いまだその予想に対する証明もしくは反例を手えるには至っていない。

5.3. Highest weight をもつ既約 unitary 表現の (N, ξ_+) 型 L^2 -WM.

$\lambda \in \Sigma_k^+$ に対し、 I_λ を Harish-Chandra 加群にもつ G の既約 admissible 表現 π_λ をとる。 $\pi_\lambda \in \text{unitary}$ に誘導された GGGR $U_{\xi_+} = L^2\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ の部分表現として実現することを考える。実現可能なためには π_λ は当然 unitary 表現であること、即ち、 I_λ が unitarizable であることが必要である。

いま、 $L^2(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \lambda) = L^2(G; \xi_+) \cap C^\infty(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \lambda)$ とおく。このとき、任意の $F \in L^2(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \lambda)$ は U_{ξ_+} に関して解析的かつ K -有限な vector になる。

unitary 表現 π_λ の U_{ξ_+} の部分表現としての実現があれば、その highest weight vector として $F \in L^2(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \lambda) \setminus \{0\}$ が定数倍を除き一意に定まる。逆に、 $F \in L^2(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \lambda) \setminus \{0\}$ が与えられたとき、 F から生成される $U_{\xi_+}(G)$ -不変な閉部分空間 $H(F) \subseteq L^2(G; \xi_+)$ 上への G の unitary 表現は π_λ と unitary 同値になる。かくして、 π_λ の U_{ξ_+} の部分表現としての実現を調べる問題は、空間 $L^2(G; \xi_+ \parallel \Sigma^+; \lambda)$ の研究に帰着された。

上で行った考察と定理 4.1 より, π_λ の (N, ξ_+) 型 L^2 -WM について 次の定理 を得る.

定理 5.4. highest weight λ をもつ G の既約 unitary 表現 π_λ が unitary に誘導された GGGR $U_{\xi_+} = L^2\text{-Ind}_N^G(\xi_+)$ の部分表現として実現できるのは, λ が正則疎系列表現に関する non-vanishing 条件 $(\lambda + \rho)(H'_\gamma) < 0, \forall \gamma \in \Sigma_\rho^+$ を満たすとき, かつそのときに限る. この場合, $\pi_\lambda \simeq D_\lambda (= \text{正則疎系列表現})$ の U_{ξ_+} における重複度は $\dim \tau_\lambda$ に等しい. ここで, τ_λ は $\lambda \in \text{highest weight}$ をもつ K の既約表現である.

5.4. 正則疎系列表現の (N, ξ_+) 型 WM. 定理 5.3 及び 5.4 より, D_λ の (N, ξ_+) 型 L^2 -WM, C^∞ -WM 及び (\mathfrak{g}, K) -WM は次の如く完全に判ったことになる.

定理 5.5. 正則疎系列表現 D_λ に対して,

$$\begin{aligned} \text{Hom}_G(D_\lambda, L^2\text{-Ind}_N^G(\xi_+)) &\simeq \text{Hom}_G((D_\lambda)_\infty, C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_+)) \\ &\simeq \text{Hom}_{\mathfrak{g}-K}(I_\lambda, C^\infty\text{-Ind}_N^G(\xi_+)) \\ &\simeq V_\lambda^* \quad (\text{線型空間の同型}) \end{aligned}$$

が成立つ. さらに, I_λ は D_λ の Harish-Chandra 加群であり, $(D_\lambda)_\infty$ は D_λ に対応する G の smooth な表現である.

定理 5.3-5.5 が 序論(1.5) で設定した 問題 C に対する
我々の(現時点における)解答である.

References

- [1] T.J.Enright, R.Howe and N.R.Wallach, A classification of unitary highest weight modules, in " Representation Theory of Reductive Groups", edited by P.C.Trombi, Birkhäuser, 1983, 97-143.
- [2] I.M.Gelfand and M.I.Graev, Categories of group representations and the problem of classifying irreducible representations, Soviet Math. Dokl., 3 (1962), 1378-1381.
- [3] R.Goodman and N.R.Wallach, Whittaker vectors and conical vectors, J. Funct. Anal., 39 (1980), 199-279.
- [4] Harish-Chandra, Representations of semisimple Lie groups, IV, Amer. J. Math., 77 (1955), 743-777; V, Ibid., 78 (1956), 1-41; VI, Ibid., 78 (1956), 564-628.
- [5] M.Hashizume, Whittaker models for representations with highest weights, Lec. in Math., Kyoto Univ., No. 14 (1982), 51-73.
- [6] H.Jacquet and R.P.Langlands, Automorphic forms on $GL(2)$, Lec. Notes in Math., Vol. 114, Springer-Verlag, 1970.
- [7] H.P.Jakobsen, Hermitian symmetric spaces and their unitary highest weight modules, J. Funct. Anal., 52 (1983), 385-412.
- [8] N.Kawanaka, Generalized Gelfand-Graev representations and Ennola duality, Advanced Studies in Pure Math., 6 (1985), 175-206.
- [9] B.Kostant, On Whittaker vectors and representation theory, Invent. Math., 48 (1978), 101-184.

- [10] H. Matsumoto, Boundary value problems for Whittaker functions on real split semisimple Lie groups, preprint (1985).
- [11] C.C. Moore, Compactifications of symmetric spaces II: The Cartan domains, Amer. J. Math., 86 (1964), 358-378.
- [12] H. Rossi and M. Vergne, Representations of certain solvable Lie groups on Hilbert spaces of holomorphic functions and the application to the holomorphic discrete series of a semisimple Lie group, J. Funct. Anal., 13 (1973), 324-389.
- [13] J.A. Shalika, The multiplicity one theorem for GL_n , Annals of Math., 100 (1974), 171-193.
- [14] V.S. Varadarajan, Infinitesimal theory of representations of semisimple Lie groups, in " Harmonic Analysis and Representations of Semisimple Lie Groups", edited by J.A. Wolf et al., Reidel, 1980.
- [15] H. Yamashita, A finite multiplicity theorem for induced representations of semisimple Lie groups and its application to generalized Gelfand-Graev representations, in preparation.
- [16] _____, Multiplicity free property for generalized Gelfand-Graev representations of semisimple Lie groups, to appear in RIMS Kôkyûroku, "群の表現の幾何学的実現", in Japanese.