

2021 年度

修士論文題目

Riemann 対称空間上における測地線の簡約部分 Lie 代数への射影に対する有界性

—低階数・低次元の場合—

学生証番号	<u>45-196010</u>
フリガナ	オクダ タカコ
氏名	<u>奥田 堯子</u>

# 目次

導入 . . . . .	2
謝辞 . . . . .	3
1 設定と射影の基本的な性質および予想 1.4 の観察 . . . . .	4
1.1 記号の設定 . . . . .	4
1.2 予想 1.4 の観察: $G = SU(1, 1)$ , $H = SO(1, 1)$ の場合 . . . . .	6
1.3 予想 1.4 の観察: 予想 1.4 の仮定を外した場合の成り立たない例 . . . . .	10
2 $G$ の実階数が 1 の場合 . . . . .	11
2.1 具体例: 実階数 1 の古典型単純 Lie 群 . . . . .	11
2.2 $G$ の実階数が 1 の場合 . . . . .	15
2.2.1 補足: 定理 2.5 の微分幾何的側面 . . . . .	21
2.3 $G$ が実階数 1 の実半単純 Lie 群の直積の場合 . . . . .	22
3 $G$ の実階数が 2 の場合 . . . . .	23
参考文献 . . . . .	24

## 導入

$G$  を非コンパクトな実半単純 Lie 群,  $K$  を  $G$  の極大コンパクト部分群で  $G$  の Cartan 対合  $\Theta$  に対して  $K = \Theta K$  なるものとする.  $\mathfrak{g} = \mathfrak{k} \oplus \mathfrak{p}$  を  $\Theta$  の微分  $d\Theta$  による  $\mathfrak{g}$  の Cartan 分解とすると,  $G/K$  は  $\mathfrak{p}$  と微分同相である.  $G/K$  に  $\mathfrak{g}$  の Killing 形式  $B$  から定まる Riemann 計量によって Riemann 多様体の構造を定める.  $G$  の単位元の  $G/K$  での像  $eK$  を通る  $G/K$  の極大測地線は  $B(X, X) = 1$  なる  $X \in \mathfrak{p}$  によって  $e^{tX}K$ ,  $t \in \mathbf{R}$  と書ける.  $H$  を  $G$  の非コンパクトな閉部分群で,  $H = \Theta H$  を満たすものとし,  $\mathfrak{h}^\perp := \{W \in \mathfrak{g} \mid B(W, \mathfrak{h}) = \{0\}\}$  とする. 「分解」という言葉の言い回し: 測地線  $e^{tX}K$  の  $\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}$  成分と  $\mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p}$  成分への分解を与える定理として次の定理が知られている.

定理 ([Kob89, Lemma 6.1])  $\pi: (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}) \oplus (\mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p}) \ni (Y, Z) \mapsto e^Y e^Z \cdot o_K \in G/K$  は上への微分同相である.

この定理を用いて  $X \in \mathfrak{p}$  に対し,  $(Y(X), Z(X)) := \pi^{-1}(e^X \cdot K) \in (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}) \oplus (\mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p})$  と定義すると, 任意の  $t \in \mathbf{R}$  に対して  $e^{tX}K = e^{Y(tX)}e^{Z(tX)}K$  である.

$G = SU(1, 1)$ ,  $H = SO(1, 1)$  とするとき,  $t \in \mathbf{R}$  に対し,  $Y(tX)$  は図 1 に図示するような幾何学的な意味を持つ. 図 1 は Poincaré 円板における測地線  $e^{tX}K$  (赤色の斜め線) とその上の一点  $e^{tX}K$  から  $eK$  の  $H$  軌道 (中央の直線) に下ろした垂線の足 (緑の丸) が  $e^{Y(tX)}K$  である.



図 1: Poincaré 円板における  $Y(tX)$  の幾何学的意味

本論文では小林俊行氏による次の予想について考察し,  $G$  が実階数 1 の場合の肯定的な結果を得た.

予想  $Y(\mathbf{R} X)$  は  $\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}$  の有界な部分集合であることと「 $[X_1, X_2] \neq 0$  であるか  $X_1 = 0$  であること」は同値である.

ただし  $X = X_1 + X_2$  はベクトル空間としての分解  $\mathfrak{p} = (\mathfrak{p} \cap \mathfrak{h}) \oplus (\mathfrak{p} \cap \mathfrak{h}^\perp)$  に対応する  $X \in \mathfrak{p}$  の分解とする.

## 謝辞

# 1 設定と $\mathfrak{h}$ 射影の基本的な性質および予想 1.4 の観察

## 1.1 記号の設定

本論文の基本的な設定は次のとおりであり、この他に必要な条件は都度明示することとする。

### 記号と定義 1.1

- $\mathbf{N}, \mathbf{R}, \mathbf{C}$ , をそれぞれ 0 を含む自然数全体, 実数全体, 複素数全体, 四元数全体の集合とする。
- $G$  を非コンパクト実半単純 Lie 群,  $H$  を  $G$  の非コンパクトな部分 Lie 群で,  $G$  の Cartan 対合  $\Theta$  に対して  $\Theta H = H$  なるものとする。
- $\mathfrak{g} := \text{Lie } G$ ,  $\mathfrak{h} := \text{Lie } H$  とし,  $\mathfrak{g} = \mathfrak{k} \oplus \mathfrak{p}$  を  $\theta := d\Theta$  による Cartan 分解とする。
- $e$  を  $G$  の単位元とし,  $o_K := eK \in G/K$  とする。
- $B(-, -)$  を  $\mathfrak{g}$  の Killing 形式とし,  $\mathfrak{h}^\perp := \{W \in \mathfrak{g} \mid B(W, \mathfrak{h}) = \{0\}\}$  とする。
- $X \in \mathfrak{p}$  に対し, ベクトル空間としての分解  $\mathfrak{p} = (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}) \oplus (\mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p})$  に対応した分解を  $X = X_1 + X_2$ ,  $X_1 \in \mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}$ ,  $X_2 \in \mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p}$  とする。

以下の定理 1.2 を用いて,  $X \in \mathfrak{p}$  に対し,  $(Y(X), Z(X)) := \pi^{-1}(e^X \cdot o_K) \in (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}) \oplus (\mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p})$  と定義する。

**定理 1.2** ([Kob89, Lemma 6.1])  $\pi: (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}) \oplus (\mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p}) \ni (Y, Z) \mapsto e^Y e^Z \cdot o_K \in G/K$  は上への微分同相である。

ここで,  $Y(\mathbf{R} X)$  の有界性について, 次の予想 1.4 が小林俊行氏によって立てられた。

**定義 1.3**  $\mathfrak{p}_{H, \text{bdd.}} := \{X \in \mathfrak{p} \mid Y(\mathbf{R} X) \text{ が } \mathfrak{h} \cap \mathfrak{p} \text{ の有界集合である.}\}$  と定める。

**予想 1.4** (by T. Kobayashi)  $\mathfrak{p}_{H, \text{bdd.}} = \{X \in \mathfrak{p} \mid [X_1, X_2] \neq 0 \text{ あるいは } X_1 = 0 \text{ である.}\}$  である。

予想 1.4 についての基本的な事項を挙げる。

### 補題 1.5

1.  $\mathfrak{p}_{H,\text{bdd.}} \subset \{X \in \mathfrak{p} \mid [X_1, X_2] \neq 0 \text{ あるいは } X_1 = 0\}$  である.
2.  $X \in \mathfrak{p}$  が  $X_1 = 0$  を満たすならば  $X \in \mathfrak{p}_{H,\text{bdd.}}$  である.
3. 1, 2 より予想 1.4 と「 $X \in \mathfrak{p}$  が  $[X_1, X_2] \neq 0$  ならば  $X \in \mathfrak{p}_{H,\text{bdd.}}$  である」は同値である.
4.  $G$  が実階数 1 のとき, 予想 1.4 と「 $\mathfrak{p}_{H,\text{bdd.}} = \{0\} \cup \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{h}$ 」は同値である.

### 補題 1.5 の証明

1. 背理法による.  $[X_1, X_2] = 0$  かつ  $X_1 \neq 0$  なる  $X \in \mathfrak{p}$  に対しては  $[X_1, X_2] = 0$  より  $e^{tX_1}e^{tX_2} \cdot o_K = e^{t(X_1+X_2)} \cdot o_K = e^{tX} \cdot o_K$  である. したがって定理 1.2 より  $Y(tX) = tX_1$ ,  $Z(tX) = tX_2$  であることから  $Y(\mathbf{R} X) = \mathbf{R} X_1$  となり,  $X_1 \neq 0$  より  $Y(\mathbf{R} X)$  は有界集合とならない.
2.  $X_1 = 0 \iff X \in \mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p}$  より  $Z(tX) = tX$ ,  $Y(tX) = 0$  であることによる.
4. 同値な命題である「 $X \in \mathfrak{p}$  に対し,  $[X_1, X_2] = 0$  かつ  $X_1 \neq 0$  であることと  $fX \in \mathfrak{h} \setminus \{0\}$  であることは同値である」を示せば良い.  $G$  の実階数は 1 で,  $H$  は非コンパクトかつ  $\Theta H = H$  であるから,  $\mathfrak{h} \subset \mathfrak{p}$  であり,  $\mathfrak{h}$  は  $\mathfrak{g}$  の極大可換部分空間である. よって  $X_1 \neq 0$  かつ  $[X_1, X_2] = 0 \implies X_2 = 0$  であり,  $X = X_1 + X_2 \in \mathfrak{h} \setminus \{0\}$  を得る.

■

$Y(\mathbf{R} X)$  の有界性は  $\text{Ad}(k)$ -不変である. つまり補題 1.6 が成り立つ.

**補題 1.6**  $k \in K$ ,  $X \in \mathfrak{p}$  に対し,  $X' := \text{Ad}(k)X$ ,  $\mathfrak{h}' := \text{Ad}(k)\mathfrak{h}$  とする.  $Y'(X'), Z'(X')$  を, 微分同相  $\pi': (\mathfrak{h}' \cap \mathfrak{p}) \oplus (\mathfrak{h}'^\perp \cap \mathfrak{p}) \ni (Y', Z') \mapsto e^{Y'}e^{Z'} \cdot o_K$  を用いて,  $X' \in \mathfrak{p}$  に対し,  $(Y'(X'), Z'(X')) = \pi'^{-1}(e^{X'} \cdot o_K)$  と定めると,  $Y(\mathbf{R} X)$  が有界であることと  $Y'(\mathbf{R} X')$  が有界であることは同値である.

**補題 1.6 の証明** 主張は  $(X, \mathfrak{h})$  と  $(X', \mathfrak{h}')$  に対して対称的であるから,  $Y(\mathbf{R} X)$  が有界ならば  $Y'(\mathbf{R} X')$  が有界であることのみを示せば十分である.

任意に  $r \in \mathbf{R}$  を取る.  $e^{rX'} \cdot o_K = e^{Y'(rX')}e^{Z'(rX')} \cdot o_K$  であり, 両辺に左から  $k^{-1}$  を掛けると,  $e^{rX} = e^{\text{Ad}(k^{-1})(Y'(rX'))}e^{\text{Ad}(k^{-1})(Z'(rX'))} \cdot o_K$  を得る. ここで  $Y'(rX') \in \mathfrak{h}' \cap \mathfrak{p}$ ,  $Z'(rX') \in \mathfrak{h}'^\perp \cap \mathfrak{p}$  であるから  $\text{Ad}(k^{-1})(Y'(rX')) \in \mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}$ ,

$\text{Ad}(k^{-1})(Z'(rX')) \in \mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p}$  である.

定理 1.2 により  $\pi$  は微分同相であるから任意の  $r \in \mathbf{R}$  に対して  $\text{Ad}(k^{-1})(Y'(rX')) = Y(rX)$  である.  $Y'(\mathbf{R}X) = \text{Ad}(k)(Y(\mathbf{R}X))$  であり,  $\text{Ad}(k)$  は有限次元空間の間の線型写像であるから有界性を保つ.

以上から補題 1.6 が示された. ■

$Z(\mathbf{R}X)$  の有界性については次の定理が知られており, 有界性の判定は Lie 環の言葉のみで行える.

**定理 1.7 ([Kob97, Lemmma 5.4])**  $X \in \mathfrak{p}$  に対し,  $\|Z(X)\| \geq \|X\| \sin \varphi(X, \mathfrak{h} \cap \mathfrak{p})$  である.

ここに  $\varphi(X, \mathfrak{h} \cap \mathfrak{p})$  は  $X$  と  $\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}$  の元がなす角度の最小値  $0 \leq \varphi(X, \mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}) \leq \frac{\pi}{2}$  であり,  $X \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{h} \iff \varphi(X, \mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}) \neq 0$  である.

つまり  $X \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{h}$  ならば  $\|Z(tX)\| \rightarrow \infty, |t| \rightarrow \infty$  である.

## 1.2 予想 1.4 の観察: $G = SU(1, 1)$ , $H = SO(1, 1)$ の場合

$G = SU(1, 1)$ ,  $H = SO(1, 1) := \left\{ \begin{pmatrix} \cosh t & \sinh t \\ \sinh t & \cosh t \end{pmatrix} \mid t \in \mathbf{R} \right\}$  の場合に予想 1.4 が正しいことは直接計算により確かめられる.

**命題 1.8**  $G = SU(1, 1)$ ,  $H = SO(1, 1)$  のとき予想 1.4 は正しい.

**補題 1.9**  $\mathfrak{g} := \mathfrak{su}(1, 1)$  の Killing 形式から定まる Poincaré 円板  $G/K = \{x + \sqrt{-1}y \mid x^2 + y^2 < 1\}$  の計量は  $\frac{8(dx^2 + dy^2)}{(1 - x^2 - y^2)^2}$  である.

**補題 1.9 の証明**  $\mathfrak{g}$  の元を  $G/K$  上の左不変ベクトル場と同一視すると  $X' := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \frac{\partial}{\partial x}$ ,  $Y' := \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{-1} \\ -\sqrt{-1} & 0 \end{pmatrix} = \frac{\partial}{\partial y}$  である.  $\mathfrak{g}$  の Killing 形式  $B$  から定まる  $\mathfrak{p}$  上のノルム  $\|-\|$  に対して  $\|X'\|^2 = \|Y'\|^2 = 8$ ,  $B(X', Y') = 0$  であって,  $0 \in G/K = \{x + \sqrt{-1}y \mid x^2 + y^2 < 1\}$  で主張が成り立つ.

したがって  $k_\theta := \text{diag}(e^{\sqrt{-1}\theta}, e^{-\sqrt{-1}\theta})$ ,  $a_r := \begin{pmatrix} \cosh r & \sinh r \\ \sinh r & \cosh r \end{pmatrix}$  とすると,

$$\begin{aligned} & g(d\tau(k_{\theta/2}a_r)(d\tau(k_{-\theta/2})X'), d\tau(k_{\theta/2}a_r)(d\tau(k_{-\theta/2})X')) \\ &= g(d\tau(k_{\theta/2}a_r)(d\tau(k_{-\theta/2})Y'), d\tau(k_{\theta/2}a_r)(d\tau(k_{-\theta/2})Y')) \\ &= 8, \\ & g(d\tau(k_{\theta/2}a_r)(d\tau(k_{-\theta/2})X'), d\tau(k_{\theta/2}a_r)(d\tau(k_{-\theta/2})Y')) = 0 \end{aligned}$$

なるような計量  $g$  が Killing 形式から誘導される計量であるが、それが主張の形であることを示せば良い (これらのベクトルが何を表しているかは図 2 参照).

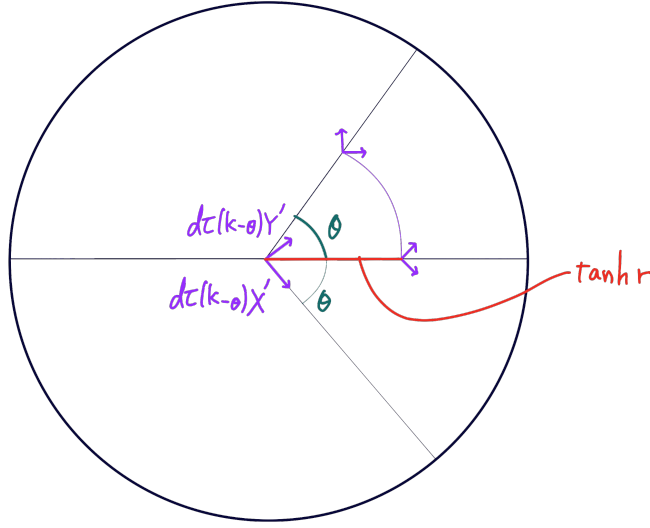


図 2

$t = 0$  での接ベクトルが  $d\tau(k_{\theta/2}a_r)d\tau(k_{-\theta/2})X'$  を与える曲線は

$$\gamma_x(t) := e^{\sqrt{-1}\theta} \frac{\cosh r \cdot e^{-\sqrt{-1}\theta} \tanh t + \sinh r}{\sinh r \cdot e^{-\sqrt{-1}\theta} \tanh t + \cosh r}$$

であるから,

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} \gamma_x(t) = d\tau(k_{\theta/2}a_r)d\tau(k_{-\theta/2})X' = (1 - \tanh^2 r) \frac{\partial}{\partial x} = (1 - x^2 - y^2) \frac{\partial}{\partial x}$$

である.



同様に  $t = 0$  での接ベクトルが  $d\tau(k_{\theta/2}a_r)d\tau(k_{-\theta/2})Y'$  を与える曲線は

$$\gamma_y(t) := e^{\sqrt{-1}\theta} \frac{\cosh r \cdot e^{-\sqrt{-1}\theta} \sqrt{-1} \tanh t + \sinh r}{\sinh r \cdot e^{-\sqrt{-1}\theta} \sqrt{-1} \tanh t + \cosh r}$$

であるから,

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} \gamma_y(t) = d\tau(k_{\theta/2}a_r)d\tau(k_{-\theta/2})Y' = (1 - \tanh^2 r) \frac{\partial}{\partial y} = (1 - x^2 - y^2) \frac{\partial}{\partial y}$$

である.

以上より  $g = \frac{8(dx^2 + dy^2)}{(1 - x^2 - y^2)^2}$  が示された. ■

**命題 1.8** の証明  $k_\theta := \text{diag}(e^{\sqrt{-1}\theta}, e^{-\sqrt{-1}\theta})$ ,  $X_\theta := k_{\theta/2} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} k_{-\theta/2}$  とすると,  $\mathfrak{p} \setminus \{0\} = \{tX_\theta \mid t \in \mathbf{R}_{>0}, 0 \leq \theta \leq \pi\}$  である. この  $X_\theta$  と  $t \in \mathbf{R}$  に対して  $Y(tX_\theta) = s \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$  なる  $s \in \mathbf{R}$  を求める.

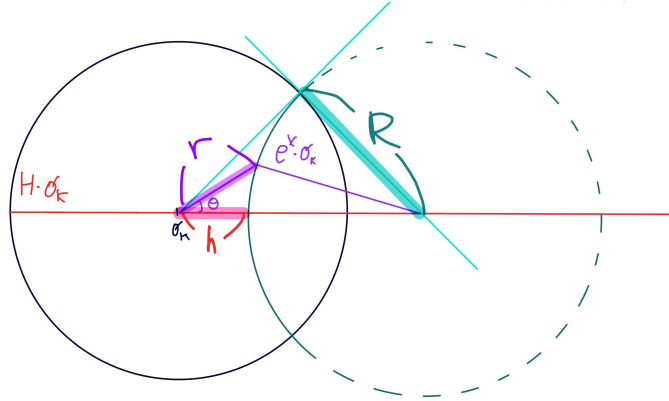


図 3

右の円の Euclid 距離での半径を  $R$  とし,  $e^{tX_\theta} \cdot o_K$  から  $H \cdot o_K$  への垂線の足の  $o_K$  からの Euclid 距離を  $h$  とするとき, 外側の青色の直角三角形に対して三平方の定理を用いて  $(h + R)^2 = R^2 + 1$  より  $R = \frac{1-h^2}{2h}$ ,  $R + h = \frac{1+h^2}{2h}$  を得る.

さらに下の紫色の三角形に対して余弦定理を用いて  $R^2 = (R + h)^2 + r^2 - 2(R +$

$h) \cos \theta$  を得,

$$\frac{2r \cos \theta}{r^2 + 1} = \frac{2h}{h^2 + 1} \quad (1.1)$$

を得る.

要確認: ここで補題 1.9 より  $\frac{r}{2\sqrt{2}} = \tanh 2\sqrt{2}t$ ,  $\frac{h}{2\sqrt{2}} = \tanh 2\sqrt{2}s$  であり (1.1) は  $\cos \theta \tanh \frac{t}{4\sqrt{2}} = \tanh \frac{s}{4\sqrt{2}}$  と書き直せる. したがって  $X_\theta$  に対して  $Y(\mathbf{R} X)$  が有界  $\iff |\cos \theta| \neq 1 \iff X \notin \mathfrak{h}$  である. ■

補足 1.10 命題 1.8 は角度を用いた議論によっても示すことができる. 具体的には, 計算により次の補題 1.11 が示せる.

補題 1.11  $e^{tY} e^{sZ} \cdot o_K = \begin{pmatrix} \cosh t & \sinh t \\ \sinh t & \cosh t \end{pmatrix} \sqrt{-1} \tanh s \in SU(1, 1)/U(1)$ ,  $t > 0$ ,  $s \in \mathbf{R}$  に対し,  $o_K$  と  $e^{tY} e^{sZ} \cdot o_K$  を結ぶ測地線が  $o_K$  と  $e^{tY} \cdot o_K$  を結ぶ測地線と  $o_K$  でなす角  $\varphi_{s,t}$  は,  $\tan \varphi_{s,t} = \frac{\tanh 2s}{\sinh 2t}$  を満たす.

ただし,  $Y := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ ,  $Z := \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{-1} \\ -\sqrt{-1} & 0 \end{pmatrix}$  とする.

補題 1.11 により命題 1.8 は次のように証明できる. 任意の  $s \in \mathbf{R}, 0 \neq t \in \mathbf{R}$  に対し,

$$\lim_{s \rightarrow -\infty} \tan \varphi_{s,t} = \frac{-1}{\sinh 2|t|} \leq \tan \varphi_{s,t} \leq \lim_{s \rightarrow \infty} \tan \varphi_{s,t} = \frac{1}{\sinh 2|t|}$$

であるから,  $X \notin \mathbf{R} Y$  の元に対して  $Y(\mathbf{R} X)$  が非有界であるとする,  $\varphi(X, \mathfrak{h}) > \varepsilon > 0$  なる  $\varepsilon$  に対し, ある  $r \in \mathbf{R}$  が存在して,  $Y(rX) = tY$ ,  $Z(rX) = sZ$  に対し  $|\tan \varphi_{s,t}| < \tan \varepsilon$  となり,  $o_K$  と  $e^{tY} e^{sZ} \cdot o_K$  を結ぶ測地線が  $o_K$  と  $e^{tY} \cdot o_K$  を結ぶ測地線と  $o_K$  でなす角が  $\varepsilon$  未満, つまり  $\mathfrak{h}$  と  $X$  の角度未満となって矛盾する ( $o_K$  と  $e^{tX} \cdot o_K (= e^{tY} e^{sZ} \cdot o_K)$  を結ぶ測地線が  $o_K$  と  $e^{tY} \cdot o_K$  を結ぶ測地線と  $o_K$  でなす角は  $\varphi(X, \mathfrak{h})$  である).

系 1.12  $G = SO(1, n)$ ,  $H = SO(1, k)$ ,  $1 \leq k \leq n-1$  に対して予想 1.4 は正しい.

系 1.12 の証明  $SO(1, n)/SO(n)$  の開球としての実現を考える. 「 $e^X \cdot o_K$  と  $o_K$  を

結ぶ直線」と  $H \cdot o_K$  で張られる超平面で  $SO(1, n)/SO(n)$  を切った際の断面を考える。

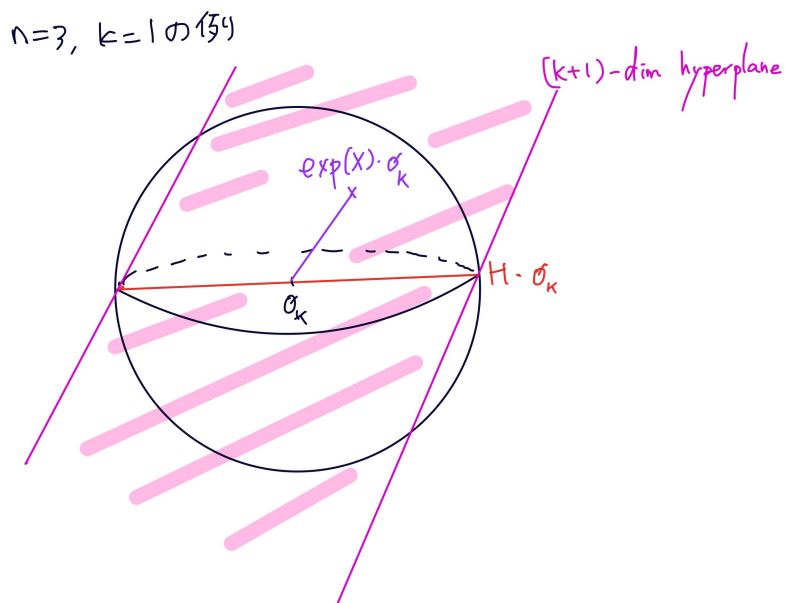


図 4

この断面に現れるのは図 3 と同じであるから、同様の計算により系 1.12 を得る。 ■

### 1.3 予想 1.4 の観察: 予想 1.4 の仮定を外した場合の成り立たない例

予想 1.4 と次の予想 1.13 は同値である。

**予想 1.13**  $\mathfrak{p}_{H, \text{bdd.}} = \{X \in \mathfrak{p} \mid [X, (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p})] \neq \{0\} \text{ あるいは } X \perp (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}) \text{ である.}\}$

ここで似た予想として次の  $\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}$  を  $\mathfrak{h}$  に置き換えた予想が立てられる。

**予想 1.14**  $\mathfrak{p}_{H, \text{bdd.}} = \{X \in \mathfrak{p} \mid [X, \mathfrak{h}] \neq \{0\} \text{ あるいは } X \perp \mathfrak{h} \text{ である.}\}$

しかし予想 1.14 には反例が存在する。

補題 1.15  $G = SL(3, \mathbf{R})$ ,  $Y_1 := \text{diag}(1, 1, -2)$ ,  $Y_2 := \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ ,

$\mathfrak{h} = \mathbf{R}Y_1 \oplus \mathbf{R}Y_2$ ,  $X = \text{diag}(1, 0, -1)$  に対し,  $[X, \mathfrak{h}] \neq \{0\}$  であるが  $Y(\mathbf{R}X) = \mathbf{R}Y_1$  であり, 非有界である.

補題 1.15 の計算  $\mathfrak{h}$  は可換 Lie 環であり,  $\mathfrak{g} = \mathfrak{sl}(3, \mathbf{R})$  の Cartan 対合  $\theta W := -{}^t W$  に対し  $\mathfrak{h} = \theta \mathfrak{h}$  である.

$[X, \mathfrak{h}] \neq 0$  は,  $[X, Y_2] \neq 0$  より従う.

ここで  $Z_1 := \text{diag}(1, -1, 0) \in \mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p}$  であり, 任意の  $t \in \mathbf{R}$  に対し,  $e^{2tX} = e^{tY_1} e^{tZ_1}$  であるから,  $Y(\mathbf{R}X) = \mathbf{R}Y_1$  となり, 補題 1.15 が示された. ■

補題 1.15 において  $X$  と  $\mathfrak{h}$  は,  $[X, \mathfrak{h}] \neq \{0\}$  だが  $[X, (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p})] = \{0\}$  かつ  $X \not\perp (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p})$  となるように取った.

つまり予想 1.14 の右辺を次の予想 1.16 のように少し弱めても補題 1.15 はその反例になっている.

予想 1.16  $\mathfrak{p}_{H, \text{bdd.}} = \{X \in \mathfrak{p} \mid [X, \mathfrak{h}] \neq \{0\} \text{ あるいは } X \perp (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{p}) \text{ である.}\}$

## 2 $G$ の実階数が 1 の場合

### 2.1 具体例: 実階数 1 の古典型単純 Lie 群

命題 2.1  $G = SO(1, n)$ ,  $SU(1, n)$ ,  $Sp(1, n)$ ,  $H = SO(1, 1)$ ,  $n \geq 2$  に対して予想 1.4 は正しい.

$G = Sp(1, 2)$ ,  $\mathfrak{h} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$  の場合にのみ示す. その他の場合も全く同様の議論である.

命題 2.2  $G = Sp(1, 2)$ ,  $H = SO(1, 1)$ ,  $X \in \mathfrak{p}$  に対し,  $Y(\mathbf{R}X)$  が有界  $\iff X \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{h}$  or  $X = 0$  である.

ただし,  $H$  は  $G$  の左上に入っている. すなわち,  $\text{Lie } H = \mathfrak{h} = \mathbf{R} A$ ,  $A := \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$  とする.

**記号と定義 2.3**  $\mathbf{H}$  を四元数体とする.  $Sp(1, 2)/Sp(1) \times Sp(2) \simeq \{(z_1, z_2) \mid z_1, z_2 \in \mathbf{H}, |z_1|^2 + |z_2|^2 < 1\} =: \mathbf{H}\mathbb{H}^2$  である. なぜならば  ${}^t(1, 0, 0)$  の自然表現  $Sp(1, 2) \curvearrowright \mathbf{H}^2$  による軌道を考え, 第 2, 第 3 成分に第 1 成分の逆数を右からかけた空間が  $\mathbf{H}\mathbb{H}^2$  と微分同相であるためであり,  $Sp(1, 2) \curvearrowright \mathbf{H}^3$  の  ${}^t(1, 0, 0)$  軌道の点  $\begin{pmatrix} z_0 \\ z_1 \\ z_2 \end{pmatrix}$  に対応する  $\mathbf{H}\mathbb{H}^2$  の点を  $\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} z_0 \\ z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ z_1 z_0^{-1} \\ z_2 z_0^{-1} \end{pmatrix} \end{bmatrix}$  と書く.

愚直な行列計算により, 次が示される.

**補題 2.4**  $\forall z, w \in \mathbf{H}$  に対し,  $\exp \begin{pmatrix} 0 & z & w \\ \bar{z} & 0 & 0 \\ \bar{w} & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh r & * & * \\ \frac{\bar{z}}{r} \sinh r & * & * \\ \frac{\bar{w}}{r} \sinh r & * & * \end{pmatrix}$ , ただし

$r := \sqrt{|z|^2 + |w|^2}$ , である.

**命題 2.2 の証明**  $X = 0 \Rightarrow Y(\mathbf{R} X) = \{0\}$  と  $X \in \mathfrak{h} \setminus \{0\}$  のときに  $Y(\mathbf{R} X)$  が非有界であることは明らかであるから,  $X \notin \mathfrak{h}$  の場合にのみ議論すればよい.

$G$  の Cartan 対合を  $\Theta(g) = (g^*)^{-1}$  ( $g^*$  は  $g$  の共役転置) とするとき,  $\Theta(e^{Y(tX)} e^{Z(tX)}) \cdot o_K = e^{-Y(tX)} e^{-Z(tX)} \cdot o_K = \Theta(e^X) \cdot o_K = e^{-X} \cdot o_K$  より, 「 $Y(\mathbf{R} X)$  が非有界  $\iff Y(\mathbf{R} X) \subset \mathbf{R} A$  が上に非有界」である.

したがって,  $Y(\mathbf{R} X)$  が非有界であるとき, 列  $\{t_n \in \mathbf{R}\}_{n \in \mathbf{N}}$  で,  $s_n \rightarrow \infty$ ,  $n \rightarrow \infty$ , ただし  $Y(t_n X) = s_n A$ , なるものが存在する.

また, 任意の  $\mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p}$  の元はある  $Z = \begin{pmatrix} 0 & z & w \\ \bar{z} & 0 & 0 \\ \bar{w} & 0 & 0 \end{pmatrix} \in \mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p}$ ,  $z, w \in \mathbf{H}$  s.t.  $|z|^2 +$

$|w|^2 = 1$  と  $r \in \mathbf{R}$  により  $rZ$  と表せる.  $Z(t_n X) = r_n Z_n$ ,  $Z_n := \begin{pmatrix} 0 & z_n & w_n \\ \overline{z_n} & 0 & 0 \\ \overline{w_n} & 0 & 0 \end{pmatrix}$ ,  $z_n, w_n \in \mathbf{H}$  s.t.  $|z_n|^2 + |w_n|^2 = 1$  とすると,  $X \notin \mathfrak{h}$  であるから定理 1.7 より  $|r_n| \rightarrow \infty$  である.  $z_n, w_n \in \mathbf{H}$  s.t.  $|z_n|^2 + |w_n|^2 = 1$  より,  $\{t_n\}$  の部分列を取るとある  $Z_\infty$  が存在して  $\lim_{n \rightarrow \infty} Z_n = Z_\infty = \begin{pmatrix} 0 & z_\infty & w_\infty \\ \overline{z_\infty} & 0 & 0 \\ \overline{w_\infty} & 0 & 0 \end{pmatrix} \in \mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p}$  なるようにできる.  $Z \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{h}$  より  $\operatorname{Re} z_\infty \neq \pm 1$  であることに注意する ( $\operatorname{Re}: \mathbf{H} \ni a + bi + cj + dk \mapsto a \in \mathbf{R}$  とする).

補題 2.4 より,

$$\begin{aligned} e^{s_n A} e^{r_n Z_n} \cdot o_K &= \begin{pmatrix} \cosh s_n & \sinh s_n & 0 \\ \sinh s_n & \cosh s_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left[ \begin{pmatrix} 1 \\ \pm \overline{z_n} \tanh |r_n| \\ \pm \overline{w_n} \tanh |r_n| \end{pmatrix} \right] \\ &= \left[ \begin{pmatrix} \cosh s_n \pm \overline{z_n} \tanh |r_n| \sinh s_n \\ \sinh s_n \pm \overline{z_n} \tanh |r_n| \cosh s_n \\ \pm \overline{w_n} \tanh |r_n| \end{pmatrix} \right], \end{aligned}$$

複号は  $r_n$  の符号  $\pm$  と同順, である. このとき  $\lim_{n \rightarrow \infty} \tanh s_n = 1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \tanh |r_n|$  と  $\lim_{n \rightarrow \infty} \operatorname{Re} z_n = \operatorname{Re} z_\infty \neq \pm 1$  に注意すると次を得る. 具体的な計算は後述する.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\sinh s_n \pm \overline{z_n} \tanh |r_n| \cosh s_n) (\cosh s_n \pm \overline{z_n} \tanh |r_n| \sinh s_n)^{-1} = 1 \quad (2.1)$$

である.

したがって,  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbf{H} \mathbb{H}^2$  から  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbf{H} \mathbb{H}^2$  へのベクトルと,  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbf{H} \mathbb{H}^2$  から  $\begin{pmatrix} (\sinh s_n \pm \overline{z_n} \tanh |r_n| \cosh s_n) (\cosh s_n \pm \overline{z_n} \tanh |r_n| \sinh s_n)^{-1} \\ * \end{pmatrix} \in \mathbf{H} \mathbb{H}^2$  へのベクトルがなす Euclidean な内積の値を  $I_n$  とすると,  $\lim_{n \rightarrow \infty} I_n = 1$  である.

しかし,  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbf{H} \mathbb{H}^2$  から  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbf{H} \mathbb{H}^2$  へのベクトルと,  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbf{H} \mathbb{H}^2$  から  $e^{t_n X} \cdot o_K \in \mathbf{H} \mathbb{H}^2$  へのベクトルがなす Euclidean な内積の値  $J_n$  は,  $X :=$

$$\begin{pmatrix} 0 & z_0 & w_0 \\ \bar{z}_0 & 0 & 0 \\ \bar{w}_0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad z_0, w_0 \in \mathbf{H} \text{ s.t. } |z_0|^2 + |w_0|^2 = 1 \text{ とするとき } J_n = \frac{\bar{z}_0}{r_0} \tanh(tr_0),$$

$r_0 := \sqrt{|z_0|^2 + |w_0|^2}$  であり,  $X \notin ha \iff z_0 \neq 1$  より  $\lim_{n \rightarrow \infty} J_n = \frac{\bar{z}_0}{r_0} \neq 1$  である.

以上 2 つの議論を合わせると  $e^{s_n A} e^{r_n Z_n} \cdot o_K = e^{t_n X} \cdot o_K \implies 1 = \lim_{n \rightarrow \infty} I_n = \lim_{n \rightarrow \infty} J_n \neq 1$  となり矛盾する.

以上より「 $X \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{h} \Rightarrow Y(\mathbf{R} X)$  有界」, したがって 命題 2.2 を得る. ■

**命題 2.2 の計算**  $\lim_{n \rightarrow \infty} |(\sinh s_n \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \cosh s_n)(\cosh s_n \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \sinh s_n)^{-1} - 1| = 0$  を示せば主張が得られる. 具体的に計算すると,

$$\begin{aligned} & \lim_{n \rightarrow \infty} |(\sinh s_n \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \cosh s_n)(\cosh s_n \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \sinh s_n)^{-1} - 1| \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{(\tanh s_n \pm \bar{z}_n \tanh|r_n|)(1 \pm z_n \tanh|r_n| \tanh s_n)}{|(1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \tanh s_n)|^2} - 1 \right| \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|(\tanh s_n \pm \bar{z}_n \tanh|r_n|)z'_n - (1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \tanh s_n)z'_n|}{|(1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \tanh s_n)|^2} \quad (*) \end{aligned}$$

である. ここで  $z'_n := 1 \pm z_n \tanh|r_n| \tanh s_n$  とすると,

$$\begin{aligned} (*) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|(\tanh s_n \pm \bar{z}_n \tanh|r_n|)z'_n - (1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \tanh s_n)z'_n|}{|(1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \tanh s_n)|^2} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|(1 - \tanh s_n)(-1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n|)z'_n|}{|(1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \tanh s_n)|^2} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|(1 - \tanh s_n)(-1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n|)|}{|(1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \tanh s_n)|} \end{aligned}$$

であり,  $0 < \min |1 \pm \operatorname{Re} z_n| \leq |(1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \tanh s_n)| \leq \sqrt{2^2 + 1^2} = \sqrt{5}$  と  $\min\{|-1 \pm \operatorname{Re} z_n|\} \leq |-1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n|| \leq \sqrt{5}$  であることと  $\lim_{n \rightarrow \infty} \operatorname{Re} z_n = \operatorname{Re} z_\infty \neq \pm 1$  より,

$$\begin{aligned} 0 &= \lim_{n \rightarrow \infty} (1 - \tanh s_n) \frac{\min\{|-1 \pm \operatorname{Re} z_n|\}}{\sqrt{5}} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|(1 - \tanh s_n)(-1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n|)|}{|(1 \pm \bar{z}_n \tanh|r_n| \tanh s_n)|} \\ &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} (1 - \tanh s_n) \frac{\sqrt{5}}{\min\{|1 \pm \operatorname{Re} z_n|\}} = 0 \end{aligned}$$

より, (2.1) が成り立つ. ■

## 2.2 $G$ の実階数が 1 の場合

**定理 2.5**  $G$  を実階数 1 の実半単純 Lie 群,  $H$  を  $G$  の非コンパクトな部分 Lie 群で,  $G$  の Cartan 対合  $\Theta$  に対して  $\Theta H = H$  で  $\dim \mathfrak{h} = 1$  とするとき, 予想 1.4 が成り立つ.

**定理 2.6** ([Hel01, p. 409, Theorem 3.1])  $\mathfrak{g} = \mathfrak{k} \oplus \mathfrak{p}$  を実半単純 Lie 環とその Cartan 対合  $\theta$  に対する Cartan 分解とし,  $\alpha, 2\alpha \in \Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{a})$  と仮定する.  $0 \neq X_\alpha \in \mathfrak{g}_\alpha$ ,  $0 \neq X_{2\alpha} \in \mathfrak{g}_{2\alpha}$  を任意に固定したとき,  $X_\alpha, X_{2\alpha}, \theta X_\alpha, \theta X_{2\alpha}$  から生成される Lie 環  $\mathfrak{g}^*$  は  $\mathfrak{su}(2, 1)$  と同型である.

以下で定理 2.6 を示すための補題や記号を設定し, 定理 2.6 を示す.

### 記号と定義 2.7

- $\mathfrak{a} \subset \mathfrak{g}$  を極大分裂可換部分代数,  $\mathfrak{m} := \mathfrak{z}_\mathfrak{k}(\mathfrak{a}) := \{W \in \mathfrak{k} \mid [W, \mathfrak{a}] = \{0\}\}$  とする.  $B$  を  $\mathfrak{g}$  の Killing 形式とする.
- $\Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{a})$  を  $\mathfrak{a}$  に関する制限ルート系とする.  $\mathfrak{g}_\lambda$  を  $\lambda \in \mathfrak{a}^*$  のルート空間とする
- $Y_\alpha := [\theta X_\alpha, X_{2\alpha}]$  とする.
- $A_\alpha \in \mathfrak{a}$  を, 任意の  $H \in \mathfrak{a}$  に対して  $B(H, A_\alpha) = \alpha(H)$  を満たす元とする. このとき, 任意の  $H \in \mathfrak{a}$  に対して  $B(H, [X_\alpha, \theta X_\alpha]) = \alpha(H)B(X_\alpha, \theta X_\alpha)$ , したがって  $[X_\alpha, \theta X_\alpha] = B(X_\alpha, \theta X_\alpha)A_\alpha$  (同様に  $[Y_\alpha, \theta Y_\alpha] = B(Y_\alpha, \theta Y_\alpha)A_\alpha$ ,  $[X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha}] = 2B(X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha})A_\alpha$ ) である.

- $c_\alpha := \sqrt{\frac{-2}{\alpha(A_\alpha)B(X_\alpha, \theta X_\alpha)}}$ ,  $c_{2\alpha} := \sqrt{\frac{-2}{\alpha(A_\alpha)B(X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha})}}$  とする.

また,

- $X_\alpha^* := c_\alpha X_\alpha$
- $X_{2\alpha}^* := c_{2\alpha} X_{2\alpha}$
- $Y_\alpha^* := [\theta X_\alpha^*, X_{2\alpha}^*] = c_\alpha c_{2\alpha} Y_\alpha$
- $A_\alpha^* := \frac{1}{12\alpha(A_\alpha)} A_\alpha$



とする.

**補題 2.8**  $c := 2\alpha(A_\alpha)B(X_\alpha, \theta X_\alpha)$  とすると,  $[X_\alpha, Y_\alpha] = cX_{2\alpha}$  である. 特に  $0 \neq Y_\alpha \neq X_\alpha$  である.

証明略, Jacobi 恒等式と  $3\alpha \notin \Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{a})$  による.

**補題 2.9**  $[X_\alpha, \theta Y_\alpha] \in \mathfrak{m} \setminus \{0\}$  である. また  $[[X_\alpha, \theta Y_\alpha], X_\alpha] = -3\alpha(A_\alpha)B(X_\alpha, \theta X_\alpha)Y_\alpha$  である.

**補題 2.9** の証明  $Y_\alpha \in \mathfrak{g}_\alpha$  より  $[X_\alpha, \theta Y_\alpha] \in \mathfrak{m} + \mathfrak{a}$  であり, 任意の  $H \in \mathfrak{a}$  に対して

$$\begin{aligned} B(H, [X_\alpha, \theta Y_\alpha]) &= B([H, X_\alpha], Y_\alpha) = \alpha(H)B(X_\alpha, [X_\alpha, \theta X_{2\alpha}]) \\ &= \alpha(H)B([X_\alpha, X_\alpha], X_{2\alpha}) \\ &= 0 \end{aligned}$$

であることより  $[X_\alpha, \theta Y_\alpha] \in \mathfrak{m}$  である.

さらに,

$$\begin{aligned} [[\theta X_\alpha, Y_\alpha], X_\alpha] &= -[[Y_\alpha, X_\alpha], \theta X_\alpha] - [[X_\alpha, \theta X_\alpha], Y_\alpha] \\ &= c[X_{2\alpha}, \theta X_\alpha] - B(X_\alpha, \theta X_\alpha)\alpha(A_\alpha)Y_\alpha \\ &= -cY_\alpha - B(X_\alpha, \theta X_\alpha)\alpha(A_\alpha)Y_\alpha \\ &= -3\alpha(A_\alpha)B(X_\alpha, \theta X_\alpha)Y_\alpha \neq 0 \end{aligned}$$

より,  $\theta[\theta X_\alpha, Y_\alpha] = [X_\alpha, \theta Y_\alpha] \in \mathfrak{m} \setminus \{0\}$  である. ■

**補題 2.10**  $\mathbf{R} X_\alpha + \mathbf{R} Y_\alpha$  は  $\text{ad}_{\mathfrak{g}}([X_\alpha, \theta Y_\alpha])$  で不変である. さらに

$$\begin{aligned} [[X_\alpha, \theta Y_\alpha], Y_\alpha] &= -6\alpha(A_\alpha)^2 B(X_\alpha, \theta X_\alpha)B(X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha})X_\alpha, \\ [Y_\alpha, \theta Y_\alpha] &= -2\alpha(A_\alpha)B(X_\alpha, \theta X_\alpha)B(X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha})A_\alpha \end{aligned}$$

である.

**補題 2.10** の証明  $[[X_\alpha, \theta Y_\alpha], Y_\alpha] \in \mathbf{R} X_\alpha$  を示せば, 補題 2.9 と併せて 補題 2.10 が従う.

$$\begin{aligned}
[[X_\alpha, \theta Y_\alpha], Y_\alpha] &= -[[\theta Y_\alpha, Y_\alpha], X_\alpha] - [[Y_\alpha, X_\alpha], \theta Y_\alpha] \\
&= B(Y_\alpha, \theta Y_\alpha)\alpha(A_\alpha)X_\alpha + c[X_{2\alpha}, [X_\alpha, \theta X_{2\alpha}]] \\
&= B(Y_\alpha, \theta Y_\alpha)\alpha(A_\alpha)X_\alpha - c[X_\alpha, [\theta X_{2\alpha}, X_{2\alpha}]] - c[\theta X_{2\alpha}, [X_{2\alpha}, X_\alpha]] \\
&= B(Y_\alpha, \theta Y_\alpha)\alpha(A_\alpha)X_\alpha - cB(X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha})\alpha(A_{2\alpha})X_\alpha
\end{aligned}$$

であり ( $\mathfrak{g}_{3\alpha} = \{0\}$  による),  $A_{2\alpha} = 2A_\alpha$  であるから,

$$[[X_\alpha, \theta Y_\alpha], Y_\alpha] = B(Y_\alpha, \theta Y_\alpha)\alpha(A_\alpha)X_\alpha - 4\alpha(A_\alpha)^2 B(X_\alpha, \theta X_\alpha)B(X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha})X_\alpha$$

を得る.

さらに,

$$\begin{aligned}
B(Y_\alpha, \theta Y_\alpha) &= B(Y_\alpha, [X_\alpha, \theta X_{2\alpha}]) = -B([X_\alpha, Y_\alpha], \theta X_{2\alpha}) \\
&= -2\alpha(A_\alpha)B(X_\alpha, \theta X_\alpha)B(X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha})
\end{aligned}$$

であるから, 最終的に

$$\begin{aligned}
[[X_\alpha, \theta Y_\alpha], Y_\alpha] &= B(Y_\alpha, \theta Y_\alpha)\alpha(A_\alpha)X_\alpha - 4\alpha(A_\alpha)^2 B(X_\alpha, \theta X_\alpha)B(X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha})X_\alpha \\
&= -6\alpha(A_\alpha)^2 B(X_\alpha, \theta X_\alpha)B(X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha})X_\alpha
\end{aligned}$$

を得る. ■

**補題 2.11**  $[[X_\alpha, \theta Y_\alpha], X_{2\alpha}] = 0$  である.

証明略. 補題 2.8–2.10 と Jacobi 恒等式による.

**補題 2.12**  $[Y_\alpha, \theta X_{2\alpha}] = 2\alpha(A_\alpha)B(X_{2\alpha}, \theta X_{2\alpha})\theta X_\alpha$  である.

証明略. Jacobi 恒等式を用いて与式を変形し計算することによる.

**定理 2.6** の証明  $\mathfrak{g}_0^* := \mathbf{R} A_\alpha \oplus \mathbf{R}[X_\alpha, \theta Y_\alpha]$ ,  $\mathfrak{g}_\alpha^* := \mathbf{R} X_\alpha \oplus \mathbf{R} Y_\alpha$ ,  $\mathfrak{g}_{-\alpha}^* := \mathbf{R} \theta X_\alpha \oplus \mathbf{R} \theta Y_\alpha$ ,  $\mathfrak{g}_{2\alpha}^* := \mathbf{R} X_{2\alpha}$ ,  $\mathfrak{g}_{-2\alpha}^* := \mathbf{R} \theta X_{2\alpha}$  とすると, 補題 2.8–2.12 より,  $\mathfrak{g}^* = \mathfrak{g}_0^* \oplus \mathfrak{g}_\alpha^* \oplus \mathfrak{g}_{-\alpha}^* \oplus \mathfrak{g}_{2\alpha}^* \oplus \mathfrak{g}_{-2\alpha}^*$  が示される.

非自明な  $\mathfrak{g}^*$  の Lie 括弧の関係は以下の通りである (残りの関係式はこの両辺に  $\theta$  をつけることで得られる).

- $[X_\alpha^*, Y_\alpha^*] = -4X_{2\alpha}^*$  (補題 2.8 による)
- $[X_\alpha^*, [X_\alpha^*, \theta Y_\alpha^*]] = -6Y_\alpha^*$  (補題 2.9 による)

- $[X_\alpha^*, \theta X_\alpha^*] = -24A_\alpha^*$  (定義による)
- $[X_\alpha^*, X_{2\alpha}^*] = 0$  ( $\mathfrak{g}_{3\alpha} = 0$  による)
- $[X_\alpha^*, \theta X_{2\alpha}^*] = \theta Y_\alpha^*$
- $[Y_\alpha^*, X_{2\alpha}^*] = 0$  (補題 2.11 による)
- $[Y_\alpha^*, \theta X_{2\alpha}^*] = -4\theta X_\alpha^*$  (補題 2.12 による)
- $[Y_\alpha^*, \theta Y_\alpha^*] = -96A_\alpha^*$  (補題 2.10 による)
- $[Y_\alpha^*, [X_\alpha^*, \theta Y_\alpha^*]] = 24X_\alpha^*$  (補題 2.10 による)
- $[[X_\alpha^*, \theta Y_\alpha^*], X_{2\alpha}^*] = [[X_\alpha^*, \theta Y_\alpha^*], \theta X_{2\alpha}^*] = 0$  (補題 2.12 による)
- $[X_{2\alpha}^*, \theta X_{2\alpha}^*] = -48A_\alpha^*$

$\mathfrak{g}^*$  と  $\mathfrak{su}(2, 1)$  の対応を,

$$\begin{aligned}
X_\alpha^* &\leftrightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, & X_{2\alpha}^* &\leftrightarrow \begin{pmatrix} \sqrt{-1} & 0 & -\sqrt{-1} \\ 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{-1} & 0 & -\sqrt{-1} \end{pmatrix}, \\
\theta X_\alpha^* &\leftrightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, & \theta X_{2\alpha}^* &\leftrightarrow \begin{pmatrix} \sqrt{-1} & 0 & \sqrt{-1} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\sqrt{-1} & 0 & -\sqrt{-1} \end{pmatrix}, \\
Y_\alpha^* &\leftrightarrow -2 \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{-1} & 0 \\ \sqrt{-1} & 0 & -\sqrt{-1} \\ 0 & \sqrt{-1} & 0 \end{pmatrix}, & \theta Y_\alpha^* &\leftrightarrow \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{-1} & 0 \\ \sqrt{-1} & 0 & \sqrt{-1} \\ 0 & -\sqrt{-1} & -0 \end{pmatrix}, \\
A_\alpha^* &\leftrightarrow \frac{1}{12} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, & [X_\alpha^*, \theta Y_\alpha^*] &\leftrightarrow -4 \begin{pmatrix} \sqrt{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -2\sqrt{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{-1} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

でつづける. この対応が Lie 環としての同型であること (上の関係式が満たされること) は計算することにより従う.

以上より定理 2.6 が示された. ■

### 補題 2.13 証明せよ

$\Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}) = \{\pm\alpha\}$  の場合, 任意に固定した  $0 \neq X_\alpha \in \mathfrak{g}_\alpha$  と  $\theta X_\alpha$  により生成される部分 Lie 環  $\mathfrak{g}'$  は  $\mathfrak{su}(1, 1)$  と同型である.

補題 2.13 の証明  $\mathfrak{g}_{2\alpha} = \mathfrak{g}_{-2\alpha} = \{0\}$  より,  $[X_\alpha, X_\alpha] = [X_{-\alpha}, X_{-\alpha}] = 0$  である.  $A_\alpha \in \mathfrak{a}$  を任意の  $H \in \mathfrak{a}$  に対して  $B(H, A_\alpha) = \alpha(H)$  を満たす元とする. 任意の

$H \in \mathfrak{a}$  に対して  $B(H, [X_\alpha, \theta X_\alpha]) = \alpha(H)B(X_\alpha, \theta X_\alpha)$  である. 任意の  $0 \neq W \in \mathfrak{g}$  に対し  $-B(W, \theta W) > 0$  より  $[X_\alpha, \theta X_\alpha] = B(X_\alpha, \theta X_\alpha)A_\alpha \neq 0$  である.

以上より  $X_\alpha$  と  $\theta X_\alpha$  により生成される  $\mathfrak{g}$  の部分 Lie 環  $\mathfrak{g}'$  は  $\mathfrak{g}' = \mathbf{R} A_\alpha \oplus \mathbf{R} X_\alpha + \mathbf{R} X_{-\alpha}$  である.

$c_\alpha := \sqrt{\frac{-2}{\alpha(A_\alpha)B(X_\alpha, \theta X_\alpha)}}$  を用いて  $\mathfrak{g}'$  と  $\mathfrak{su}(1, 1)$  の対応を

$$\begin{aligned} \frac{1}{B(A_\alpha, A_\alpha)} A_\alpha &\leftrightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, & c_\alpha X_\alpha &\leftrightarrow \begin{pmatrix} \sqrt{-1} & -\sqrt{-1} \\ \sqrt{-1} & -\sqrt{-1} \end{pmatrix}, \\ c_\alpha X_{-\alpha} &\leftrightarrow \begin{pmatrix} \sqrt{-1} & \sqrt{-1} \\ -\sqrt{-1} & -\sqrt{-1} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

により与えると, これは  $\mathfrak{g}'$  と  $\mathfrak{su}(1, 1)$  の間の同型になっている. チェックせよ ■

**系 2.14** 任意の  $Y \in \mathfrak{h} \setminus \{0\}$  と任意の  $X \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{a}$  を固定したとき,  $G$  が実階数 1 ならば, 極大分裂可換部分代数  $\mathfrak{a} := \mathbf{R} Y \subset \mathfrak{g}$  に対し  $\Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}) = \{\pm\alpha\}$  あるいは  $\Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}) = \{\pm\alpha, \pm 2\alpha\}$  であるから, それぞれ定理 2.6 と補題 2.13 より,  $X, Y$  を含む部分 Lie 環  $\mathfrak{g}_0 \subset \mathfrak{g}$  で,  $\mathfrak{g}_0 \simeq \mathfrak{su}(1, 1)$  か  $\mathfrak{g}_0 \simeq \mathfrak{su}(2, 1)$  なるものが存在する.

**系 2.14 の証明**

$\Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}) = \{\pm\alpha\}$  の場合

$\mathfrak{g} = \mathfrak{g}_0 \oplus \mathfrak{g}_\alpha \oplus \mathfrak{g}_{-\alpha}$ ,  $\mathfrak{g}_0 := \mathfrak{z}_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{a})$  より  $X \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{a}$  をこの分解に対応して  $X = X_0 + X_\alpha + X_{-\alpha}$  と分解すると,  $X \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{a}$  より  $X_{-\alpha} = -\theta X_\alpha \neq 0$  である.  $Y \in \mathbf{R}[X_\alpha, \theta X_\alpha]$  であるからこの  $X_\alpha \neq 0$  に補題 2.13 を適用することにより  $\mathfrak{g}_0 \simeq \mathfrak{su}(1, 1)$  で  $X, Y \in \mathfrak{g}_0$  なるものが存在する.

$\Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}) = \{\pm\alpha, \pm 2\alpha\}$  の場合

$\mathfrak{g} = \mathfrak{g}_0 \oplus \mathfrak{g}_\alpha \oplus \mathfrak{g}_{-\alpha} \oplus \mathfrak{g}_{2\alpha} \oplus \mathfrak{g}_{-2\alpha}$ ,  $\mathfrak{g}_0 := \mathfrak{z}_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{a})$  より  $X \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{a}$  をこの分解に対応して  $X = X_0 + X_\alpha + X_{-\alpha} + X_{2\alpha} + X_{-2\alpha}$  と書くと,  $X \in \mathfrak{p}$  より  $X_{-\alpha} = -\theta X_\alpha$ ,  $X_{-2\alpha} = -\theta X_{2\alpha}$  である.

ここで  $X \notin \mathfrak{a}$  より,

1.  $X_\alpha \neq 0$  かつ  $X_{2\alpha} \neq 0$
2.  $X_\alpha \neq 0$  かつ  $X_{2\alpha} = 0$
3.  $X_\alpha = 0$  かつ  $X_{2\alpha} \neq 0$

のいずれかである.

- 1 の場合はこの  $X_\alpha, X_{2\alpha}$  と  $Y$  に,
- 2 の場合はこの  $X_\alpha$  と, 適当な  $0 \neq X'_{2\alpha} \in \mathfrak{g}_{2\alpha}$  と  $Y$  に,
- 3 の場合はこの  $X_{2\alpha}$  と, 適当な  $0 \neq X'_\alpha \in \mathfrak{g}_\alpha$  と  $Y$  に,

定理 2.6 を適用することにより  $\mathfrak{g}_0 \simeq \mathfrak{su}(2, 1)$  で  $X, Y \in \mathfrak{g}_0$  なるものが存在する.

■

系 2.14 で定めた  $\mathfrak{g}_0$  について次の 3 つが成り立つ.

**補題 2.15** [Hel01, p. 409, Lemma 2.2]  $\mathfrak{g}$  の Cartan 対合  $\theta$  に対して  $\mathfrak{g}_0 = \theta \mathfrak{g}_0$  であり,  $\mathfrak{g}_0$  への  $\theta$  の制限は  $\mathfrak{g}_0$  の Cartan 分解を与える.

**補題 2.16** ([Yos38, p. 82]) 系 2.14 の  $\mathfrak{g}_0$  の  $G$  における解析的部分群を  $G_0$  とする.  $G_0$  は  $G$  の閉部分群である.

**補題 2.17** ([Hel01, p. 409, Lemma 2.3]) 系 2.14 の  $\mathfrak{g}_0$  の  $G$  における解析的部分群を  $G_0$  とする.  $G = KAN$  を  $G$  の岩澤分解,  $G_0 = K_0 A_0 N_0$  を  $G$  の岩澤分解とすると,

$$K_0 := G_0 \cap K, \quad A_0 := G_0 \cap A, \quad N_0 := G_0 \cap N,$$

であり,  $G_0/K_0 \simeq G_0/K$  は  $G/K$  の全測地的な部分 Riemann 多様体である.

以上のことを用いて,  $G$  が実階数 1 の場合を  $SU(1, 2)$  ないし  $SU(1, 1)$  に帰着させることにより定理 2.5 を示す.

**定理 2.5** の証明  $\mathfrak{g}$  の極大分裂可換部分代数  $\mathfrak{h}$  の定めるルート系を  $\Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$  とし,  $\Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$  の形によって 2 通りに場合分けして証明する.

$\Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{h}) = \{\pm\alpha\}$  のとき

系 2.14 により  $X$  と  $\mathfrak{h}$  を含む部分 Lie 環  $\mathfrak{g}' \subset \mathfrak{g}$  で  $\mathfrak{su}(1, 1)$  に同型なものが存在する.  $\mathfrak{g}'$  に対応する  $G$  の解析的部分群を  $G'$  とし, その岩澤分解を  $G' = K' A' N'$  とする. このとき  $e^{Z(tX)} \cdot o_K = e^{-Y(tX)} e^{tX} \cdot o_K \in G'/K$  であるから  $Z(tX) \in \mathfrak{g}' \cap \mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p} \subset$  であり,  $Y(\mathbf{R}X)$  の有界性は全測地的な部分 Riemann 多様体

$G'/K' \subset G/K$  に対して行えば良いことがわかる．したがって命題 1.8 により  $X \in \mathfrak{p}_{H,\text{bdd.}} \iff X = 0$  あるいは  $X \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{h}$  が言え，定理 2.5 が示された．

$\Sigma(\mathfrak{g}, \mathfrak{a}) = \{\pm\alpha, \pm 2\alpha\}$  のとき

系 2.14 により  $X$  と  $\mathfrak{h}$  を含む部分 Lie 環  $\mathfrak{g}^* \subset \mathfrak{g}$  で  $\mathfrak{su}(2, 1)$  に同型なものが存在する． $\mathfrak{g}^*$  に対応する  $G$  の解析的部分群を  $G^*$  とし，その岩澤分解を  $G^* = K^*A^*N^*$  とする．このとき  $e^{Z(tX)} \cdot o_K = e^{-Y(tX)}e^{tX} \cdot o_K \in G'/K$  であるから  $Z(tX) \in \mathfrak{g}^* \cap \mathfrak{h}^\perp \cap \mathfrak{p} \subset$  であり， $Y(\mathbf{R}X)$  の有界性は全測地的な部分 Riemann 多様体  $G^*/K^* \subset G/K$  に対して行えば良いことがわかる．したがって命題 2.1 により  $X \in \mathfrak{p}_{H,\text{bdd.}} \iff X = 0$  あるいは  $X \in \mathfrak{p} \setminus \mathfrak{h}$  が言え，定理 2.5 が示された．

■

### 2.2.1 補足: 定理 2.5 の微分幾何的側面

**定義 2.18** [Ebe72a, Definition 1.3]

$M$  が完備かつ非正曲率をもつ 1-連結 Riemann 多様体であるとき， $M$  を Hadamard 多様体といい，Hadamard 多様体  $M$  が visibility manifold であるとは， $\forall p \in M, \forall \varepsilon > 0$  に対し，ある  $r(p, \varepsilon) > 0$  が存在して，測地線  $\gamma: [t_0, t_1] \rightarrow X$  が  $d_M(p, \gamma(t)) \geq r(p, \varepsilon), \forall t \in [t_0, t_1]$  ならば， $\angle_p(\gamma(t_0), \gamma(t_1)) \leq \varepsilon$  であることである．



図 5: visibility manifold のイメージ

**定理 2.19** [BH99, p. 296, 9.33 Theorem], originally [Ebe72b, Theorem 4.1]

$\exists C \subset M$  s.t.  $M = \bigcup_{\text{cpt.}} \{f(C) \mid f \in \text{Isom}(M)\}$  なる Hadamard 多様体  $M$  に対し, 次は同値である.

- (i)  $M$  は visibility manifold である.
- (ii) 全測地的な部分 Riemann 多様体  $M' \subset M$  で  $\mathbf{R}^2$  と等長同型なものが存在しない.

ここで Riemann 対称空間は Hadamard 多様体であり, 定理 2.19 の (ii) は  $G$  の実階数が 1 以下であることと同値である. したがって  $G$  の実階数が 1 の場合  $G/K$  は visibility manifold であり,  $G = SU(1, 2)$ ,  $H = SO(1, 1)$  の場合の証明と全く同様にして背理法により予想 1.4 が示される.

### 2.3 $G$ が実階数 1 の実半単純 Lie 群の直積の場合

定理 2.5 の系として次が示される.

**系 2.20**  $n \in \mathbf{N}$  を固定し,  $\{G_i\}_{1 \leq i \leq n}$  を実階数 1 の実半単純 Lie 群の族,  $\Theta_i$  を  $G_i$  の Cartan 対合とする.

$G$  を  $\{G_i\}_{1 \leq i \leq n}$  の直積からなる Lie 群  $G = G_1 \times \cdots \times G_n$  とし,  $H$  を  $G$  の非

コンパクトな部分 Lie 群で,  $G$  の Cartan 対合  $\Theta: G \rightarrow G$ ,  $G \ni (g_1, \dots, g_n) \mapsto (\Theta_1 g_1, \dots, \Theta_n g_n) \in G$  に対して  $\Theta H = H$  で  $\dim \mathfrak{h} = 1$  なるものとする. このとき予想 1.4 が成り立つ.

系 2.20 の証明 各  $G_i$  を  $G$  の部分 Lie 群と自然にみなす. このとき  $H_i := G_i \cap H$  とすると,  $H \simeq H_1 \times \dots \times H_n$  である. 同様に  $\mathfrak{g}_i \subset \mathfrak{g} = \bigoplus_{1 \leq i \leq n} \mathfrak{g}_i$  とみなすと  $\mathfrak{h}_i := \mathfrak{g}_i \cap \mathfrak{h}$  は  $H_i$  の Lie 環である.

$K_i$  を  $\Theta K_i = K_i$  なる  $G_i$  の極大コンパクト部分群とすると,  $K := K_1 \times \dots \times K_n$  は  $G$  の極大コンパクト部分群で  $\Theta K = K$  を満たす.

$G/K \simeq G_1/K_1 \times \dots \times G_n/K_n$  であり, 定理 1.2 により各  $1 \leq i \leq n$  の  $(G_i, H_i, \Theta_i)$  に対し上への微分同相  $\pi_i: (\mathfrak{h}_i \cap \mathfrak{p}_i) \oplus (\mathfrak{h}_i^\perp \cap \mathfrak{p}_i) \ni (Y, Z) \mapsto e^Y e^Z \cdot o_K \in G_i/K_i$  が存在する.  $X_i \in \mathfrak{p}_i$  に対し  $(Y_i(X_i), Z_i(X_i)) := \pi_i^{-1}(e^{X_i} K_i)$  と定める.

$X \in \mathfrak{p}$  に対し,  $X = X^{(1)} + \dots + X^{(n)}$  を  $\mathfrak{p} = \bigoplus_{1 \leq i \leq n} \mathfrak{p}_i$  に対応する  $X$  の分解とすると,  $Y(\mathbf{R} X)$  が有界であることは各  $Y_i(\mathbf{R} X^{(i)})$  が有界であることと同値である. また定理 2.5 より  $Y_i(\mathbf{R} X^{(i)})$  が有界であることと  $[X_1^{(i)}, X_2^{(i)}] \neq 0$  あるいは  $X_1^{(i)} = 0$  であることが同値である. ここで  $X^{(i)} = X_1^{(i)} + X_2^{(i)}$  は  $\mathfrak{p}_i = (\mathfrak{h}_i \cap \mathfrak{p}_i) \oplus (\mathfrak{h}_i^\perp \cap \mathfrak{p}_i)$  に対応する  $X^{(i)} \in \mathfrak{p}_i$  の分解とする.

したがって,  $Y(\mathbf{R} X)$  が非有界であることと  $[X_1, X_2] = 0$  かつ  $X_1 \neq 0$  であることが同値であり, 系 2.20 が示された. ■

### 3 $G$ の実階数が 2 の場合

命題 3.1  $G = SL(3, \mathbf{R})$ ,  $H = \{\text{diag}(e^a, e^b, e^c) \mid a, b, c \in \mathbf{R}, a + b + c = 1\}$ ,

$X := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$  に対し  $Y(\mathbf{R} X)$  は非有界である.

$\mathfrak{h} = \{\text{diag}(a, b, c) \mid a, b, c \in \mathbf{R}, a + b + c = 0\}$  であるから  $X_1 = \text{diag}(1, 0, -1)$ ,  $X_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$  であり,  $[X_1, X_2] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \neq 0$  より  $X$  は予想 1.4 の右



辺の集合には入っているが,  $X \notin \mathfrak{p}_{H,\text{bdd}}$ . であるから,

## 参考文献

- [Ber88] J. N. Bernstein, *On the support of Plancherel measure*, J. Geom. Phys., Vol. 5, n. 4, 1988, pp. 663–710.
- [BBE85] W. Ballmann, M. Brin and P. Eberlein, *Structure of manifolds of nonpositive curvature. I*, Ann. of Math. (2), Vol. 122, No. 1, 1985, pp. 171–203.
- [BH99] M. R. Bridson and A. Haefliger, *Metric Spaces of Non-Positive Curvature*, Grundlehren der mathematischen Wissenschaften, Vol. 319, Springer, 1999.
- [Borel–Ji] A. Borel and L. Ji, *Compactifications of Symmetric and Locally Symmetric Spaces*, Mathematics: Theory & Applications, Birkhäuser Boston, 2006.
- [Ebe72a] P. Eberlein, *Geodesic Flows on Negatively Curved Manifolds I*, Ann. of Math. (2), Vol. 95, 1972, pp. 492–510.
- [Ebe72b] P. Eberlein, *Geodesic Flow in Certain Manifolds without Conjugate Points*, Trans. Amer. Math. Soc., Vol. 167, 1972, pp. 151–70.
- [EO73] P. Eberlein and B. O’Neill, *Visibility Manifolds*, Pacific J. Math., Vol. 46, No. 1, 1973, pp. 45–109.
- [Hel84] S. Helgason, *Groups and Geometric Analysis—Integral Geometry, Invariant Differential Operators, and Spherical Functions*, Mathematical Surveys and Monographs, Vol. 83, AMS, 1984.
- [Hel01] S. Helgason, *Differential Geometry, Lie Groups, and Symmetric Spaces*, GSM, Vol. 34, AMS, 2001.
- [Kob89] T. Kobayashi, *Proper action on a homogeneous space of reductive type*, Math. Ann., Vol. 285, Issue. 2, 1989, pp. 249–263.
- [Kob97] T. Kobayashi, *Invariant measures on homogeneous manifolds of reductive type*, J. Reine Angew. Math., Vol. 1997, No. 490–1, 1997, pp. 37–54.
- [Yos37] K. Yosida, *A problem concerning the second fundamental theorem of*

*Lie*, Proc. Imp. Acad., Vol. 13, No. 5, 1937, pp. 152–155.

[**Yos38**] K. Yosida, *A Theorem concerning the Semi-Simple Lie Groups*,  
Tohoku Mathematical Journal, First Series, Vol. 44, 1938, pp. 81–84.