数理解析研究所講究録
第276巻 1976年 56-70

Isometryによって不変な閉測地線について

東工大 理　田中 実

§1. 序文

コンパクトなリーマン多様体上の閉測地線の数を、調べることは興味ある問題である。この問題に関して、Gromoll と Meyer ([2]) によって得られた定理がある。

<u>Theorem.</u> (Gromoll, Meyer)　Mを単連結なコンパクトリーマン多様体とする。Mの free loop space のベッチ数から作られる数列が有界でないならば、M上には、閉測地線が無限に存在する。

この定理より、以下の問題を考えつく。

<u>問題.</u>　hを単連結、コンパクトなリーマン多様体M上の isometryとする。もし、空間 $C^0(M, h) = \{\gamma : [0,1] \to M \,/\, \gamma$ は、$h(\gamma(0)) = \gamma(1)$ を満たす連続な曲線$\}$ のベッチ数からなる数列が有界でないならば、hで不変な測地線は無限に存在するか?

ここで、測地線$\gamma:\mathbb{R}\to M$がhで不変だとは、勝手なtに対して、$h(\gamma(t))=\gamma(t+\theta)$となる定数$\theta\,(\geq 0)$が存在する時に言う。$h$が involutive ($h^2=id.$) である時、Grove [6] によって、さらにhが素数の order の isometry に対しては著者 [9] により、それぞれ肯定的に解決された。1974年末に Grove は素数のベキ order の isometry に対しても成り立つことを主張した。(しかしながら、彼の証明には、不完全な点があることが、後に著者により指摘された。) その後、すぐに著者により独立に、それが解決された。([10]) 本論文において、有限の order をもつ isometry に対しても成り立つことを示す。

<u>Main theorem</u>. Mをコンパクト、単連結なリーマン多様体とし、fをM上の isometry で、有限の order をもつとする。もし、$C^0(M,f)$のベッチ数からなる数列が、非有界ならばfで不変な閉測地線が無限に存在する。

注1. Cor. として、Gromoll・Meyer の定理の閉測地線の存在よりも、多様体によっては、さらに詳しい結果が得られる。つまり、恒等写像 $id.$ と homotopic な cyclic な勝手な isometry fに対して、fで不変な閉測地線も無限に存在する。

注2. M. Vigué-Poirrier と D. Sullivan [8] により以下の2つの性質が同値であることが示されている。

(i) Mの(rational)cohomology algebra の generator は少なくとも2つある。

(ii) Mの free loop space のベッチ数からなる数列は、非有界である。

Main theorem より、Vigué-Poirrier, Sullivan の定理の拡張を考えるのは意味があるだろう。

主定理の証明の方針は、finite order をもつ isometry f で不変な閉測地線が有限本しかないと仮定することにより、$C^0(M, f)$ のベッチ数が一様に有界になることを示す。

§2. 準備

Mを $(n+1)$ 次元のコンパクトなリーマン多様体とし、$\langle\ ,\ \rangle$ をMのリーマン計量とする。g を order s (s は自然数) の isometry とする。$\Omega(M, g)$ を絶対連続 $\sigma : [0, 1] \to M$, $g(\sigma(0)) = \sigma(1)$ でその速度ベクトル σ' が、$\int_0^1 \langle \sigma'(t), \sigma'(t) \rangle dt < \infty$ である曲線からなる集合とする。$\Omega(M, g)$ には、完備なヒルベルト・リーマン多様体の構造がはいる([4])。しかも、$C^0(M, g)$ と $\Omega(M, g)$ は homotopy 同値になる([4])。$\Omega(M, g)$ の各元は、自然に $\mathbb{R}$ からMへの写像と考えられる。

$g^s = id.$ と仮定したから．$\Omega(M,g)$ の各元は，周期 s の曲線になる。$\Omega(M,g)$ 上にパラメーターの移動によって定義される $S^1 = [0,s]/\{0,s\}$-action がある。エネルギー関数 $E^g : \Omega(M,g) \to \mathbb{R}$ を，$E^g(c) = 1/2 \int_0^1 \langle \dot{c}(t), \dot{c}(t) \rangle dt$ で定義する。c が E^g の critical point であることと，c が g で不変な閉測地線であることとは，同値である（[4]）。もし，c が nonconst.（i.e. $E^g(c) \neq 0$）ならば，常に critical orbit $S^1 \cdot c = \{\beta(c) \mid \beta \in S^1\}$ 上にある。明らかに，$S^1 \cdot c$ の各元は，E^g の critical point である。次に，孤立した critical orbit に対して，local homological invariant と呼ばれるある種の homology を定義する。Gromoll と Meyer（[3]）によって，この homology は定義されたが，有限次元の場合には，すでに Morse により定義されたものである。まず，exp を M の exponential map とし，$\overline{\exp} : N \to \Omega(M,g)$，$Y \mapsto \exp \circ Y$ で $\overline{\exp}$ を定義する。ここで，N は normal bundle $\pi : N \to S^1 \cdot c$ の total space を示す。$\tilde{N} \to S^1 \cdot c$ を normal disc bundle とした時，$\tilde{N}$ が十分小さいならば，$\mathcal{D} = \overline{\exp}(\tilde{N})$ が $S^1 \cdot c$ の tubular neighborhood になるようにできる。c での fiber を $\mathcal{D}_c = \overline{\exp}(\tilde{N}_c)$（$\tilde{N}_c$：$c$ 上の fiber）とし，E^g_c を $\mathcal{D}_c$ への E^g の制限とする。$S^1 \cdot c$ を孤立した critical orbit としよう。もし必要なら，さらに小さい tubular neighborhood $\mathcal{D}$ をとれば，

c は $\mathcal{D}_c$ で E^g_c の唯一の critical point となるようにできる。W_c, W_c^- を c における $\mathcal{D}_c$ 上のエネルギー関数 E^g_c に対する admissible regions ([3]) とする。孤立した critical orbit $S^1 \cdot c$ に対する E^g の local homological invariant $\mathcal{H}(E^g, S^1 \cdot c)$ を、

$$\mathcal{H}(E^g, S^1 \cdot c) = H_*(S^1 \cdot W_c, S^1 \cdot W_c^-)$$

で定義する。このhomologyは標数zeroの体を係数とするsingular homologyを使う。便宜上、c での E^g_c に対する local homological invariant $\mathcal{H}(E^g_c, c)$ を、

$$\mathcal{H}(E^g_c, c) = H_*(W_c, W_c^-)$$

で定義しておく。これらの定義は、W_c, W_c^-, $\mathcal{D}$ の取り方には依存しない。Gromoll と Meyer ([3]) による shifting theorem より、

$$\mathcal{H}_{k+\lambda}(E^g_c, c) = \mathcal{H}^0_k(E^g_c, c)$$

が成り立つ。ここで、λ は c の index、$\mathcal{H}^0_k$ は characteristic invariant を表わす。E^g_c の degenerate part に E^g_c を制限して、c の local homological invariant を定義したものである。E^g_c の null space の次元は $2n$ 以下だから、$k > 2n$ ならば $\mathcal{H}^0_k(E^g_c, c) = 0$ である。すでに [9] で以下の2つの評価を得ている。

(2.1). $B_k(c, g) \leq B^0_{k-\lambda}(c, g) + B^0_{k-\lambda-1}(c, g)$

ここで、$B_k(c, g) = \dim \mathcal{H}_k(E^g, S^1 \cdot c)$, $B^0_k(c, g) = \dim \mathcal{H}^0_k(E^g_c, c)$。

$a<b$ を E^g の regular values とし，$(E^g)^{-1}[a,b]$ の中にある critical set は，有限個の critical orbits $S^1 \cdot c^1, \cdots, S^1 \cdot c^r$ からなるものとする。この時，Morse の不等式を得る。

(2.2) $\quad b_k(\Omega^b(M,g), \Omega^a(M,g)) \leq \sum_{i=1}^{r} B_k(c^i, g)$

ここで，$\Omega^b(M,g) = (E^g)^{-1}[0,b]$，$b_k(\Omega^b, \Omega^a) = \dim H_k(\Omega^b, \Omega^a)$。

§3. index と nullity

(2.1) と (2.2) 式により，critical point の index ならびに nullity の評価と characteristic invariant $\mathcal{H}^0$ の上からのそれをする必要がある。各整数 $m\ (\neq 0)$ に対して，iteration map $m: \Omega(M,g) \to \Omega(M,g^m)$ を $m(\sigma)(t) = \sigma_m(t) = \sigma(mt)$ で定義する。次の定理は，重要な定理で，本質的に Gromoll と Meyer ([2]) により証明されている。

Theorem 3.1. $S^1 \cdot c$ を $\Omega(M,g)$ の nonconst. $(E^g(c) \neq 0)$ な critical orbit で，ある整数 $m\ (\neq 0)$ に対して，$S^1 \cdot c_m$ が孤立した critical orbit で $\nu(c,g) = \nu(c_m, g^m)$ が成り立つとする。その時，任意の k に対して，$\mathcal{H}^0_k(E^g_c, c) \cong \mathcal{H}^0_k(E^{g^m}_{c_m}, c_m)$ が成り立つ。ここで，$\nu(c,g)$ (resp. $\nu(c_m, g^m)$) は，$\Omega(M,g)$ (resp. $\Omega(M,g^m)$) の critical orbit $S^1 \cdot c$ (resp. $S^1 \cdot c_m$) の nullity を表わす。

fをorder s の isometry とする。一つの critical point から生成される critical orbits の index, nullity について調べよう。もし、γ が nonconst. な f で不変な閉測地線であるとすれば、最小周期が s/m (≤ 1) であるようなある critical point c によって、γ を表現できる。m_0 と s_0 を互いに素な正整数で $s_0/m_0 = s/m$ を満たすものとする。n_0 と k_0 を、$m_0 \cdot n_0 = 1 + s_0 \cdot k_0$ を満たすようにとる。$\bar{c}(t) = c(t/m_0)$ と定義すれば、$\bar{c}$ は E^g $(g = f^{n_0})$ の critical point になる。$\bar{c}$ の最小周期は s_0 で、$\bar{c}$ は f^{s_0} で固定されている。$m s_0 + k m_0 \neq 0$ を満たす勝手な整数 m と k に対して、$\bar{c}_{m s_0 + k m_0}$ は、E^{f^k} の critical point である。$\{S^1 \cdot \bar{c}_{m s_0 + m_0};\ m \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}\}$ は、γ によって生成される $\Omega(M, f)$ の中のすべての critical orbits である。まず、$S^1 \cdot \bar{c}_{m s_0 + k m_0}$ の、index と nullity の公式を求めよう。$f = id.$ の場合、Bott ([1]) が見つけたような公式を我々は必要とする。$V_{\bar{c}}$ を $\bar{c}$ に各点で直交する C^∞ ベクトル場からなるベクトル空間とする。線型写像 $L : V_{\bar{c}} \to V_{\bar{c}}$ を

$$LX = -X'' - R(X, \bar{c}')\bar{c}'$$

で定義する。$\lambda(\bar{c}_{m s_0 + k m_0}, f^k)$ (resp. $\nu(\bar{c}_{m s_0 + k m_0}, f^k)$) を critical orbit $S^1 \cdot \bar{c}_{m s_0 + k m_0}$ $(\subset \Omega(M, f^k))$ の index (resp. nullity) とする。Morse ([12]) が示したように

$$(3.1)\begin{cases} \lambda(\bar{C}_{ms_0+\nu m_0}, f^{\nu}) = \sum_{\mu<0} \dim\{X\in V_C \mid LX=\mu X,\ \forall t\in\mathbb{R} \text{ に対して, } X(t+ms_0+\nu m_0) = f_*^{\nu}(X(t))\} \\ \nu(\bar{C}_{ms_0+\nu m_0}, f^{\nu}) = \dim\{X\in V_C \mid LX=0\ \forall t\in\mathbb{R} \text{ に対して, } X(t+ms_0+\nu m_0) = f_*^{\nu}(X(t))\} \end{cases}$$

となる。V_Cを複素化し、それを再びV_Cと書く。さらにf_*, g_*, Lを $\mathbb{C}$-linear map に拡張し、それらを再び同じ記号で表わす。各実数μと$\omega\in S^1\subset\mathbb{C}$に対して、$S_C[\mu, ms_0+\nu m_0, \omega f_*^{\nu}] = \{X\in V_C \mid LX=\mu X,\ X(t+ms_0+\nu m_0) = \omega f_*^{\nu}(X(t))\}$ と定義する。

<u>Lemma 3.2.</u> 任意の実数μと$ms_0+\nu m_0\neq 0$なる任意の整数m, νに対して、1), 2), 3) が成り立つ。

1) $S_C[\mu, ms_0+\nu m_0, f_*^{\nu}] = \bigoplus_{\omega^{(ms_0+\nu m_0)S}=1} S_C[\mu, 1, \omega g_*] \cap S_C[\mu, ms_0+\nu m_0, f_*^{\nu}]$

2) $S_C[\mu, 1, \omega g_*] \cap S_C[\mu, ms_0+\nu m_0, f_*^{\nu}] = S_C[\mu, 1, \omega g_*] \cap \ker\{(f_*^{s_0})^{mn_0+\nu k_0} - \omega^{-(ms_0+\nu m_0)}\}$

ここで、$f_*^{s_0} : V_C \to V_C$ を、$(f_*^{s_0}X)(t) = f_*^{s_0}(X(t))$ で定義した。

3) $S_C[\mu, 1, \omega g_*] \cap \ker\{(f_*^{s_0})^{mn_0+\nu k_0} - \omega^{-(ms_0+\nu m_0)}\} = \bigoplus_{z^{mn_0+\nu k_0}=\alpha^{-1}} S_C[\mu, 1, \omega g_*] \cap \ker(f_*^{s_0} - z)$

ここで、$\alpha = \omega^{ms_0+\nu m_0}$.

証明は、f が prime power order の場合とまったく同様にできる。([10])。このLemmaより、

$$\mathcal{S}_{\mathbb{C}}[\mu, ms_0+km_0, f_*^k] = \bigoplus_{\alpha^s=1} \bigoplus_{\omega^{ms_0+km_0}=\alpha} \bigoplus_{z^{mn_0+kk_0}=\alpha^{-1}} \mathcal{S}_{\mathbb{C}}[\mu, 1, \omega g_*] \cap \ker(f_*^{s_0}-z)$$

$$= \bigoplus_{\alpha^{s/s_0}=1} \bigoplus_{\omega^{ms_0+km_0}=\alpha} \bigoplus_{z^{mn_0+kk_0}=\alpha^{-1}} \mathcal{S}_{\mathbb{C}}[\mu, 1, \omega g_*] \cap \ker(f_*^{s_0}-z)。$$

各 $z \in S^1 \subset \mathbb{C}$ と $\omega \in S^1$ に対して、$\Lambda^z(\omega) = \sum_{\mu<0} \dim_{\mathbb{C}}\{\mathcal{S}_{\mathbb{C}}[\mu, 1, \omega g_*] \cap \ker(f_*^{s_0}-z)\}$, $N^z(\omega) = \dim_{\mathbb{C}}\{\mathcal{S}_{\mathbb{C}}[0, 1, \omega g_*] \cap \ker(f_*^{s_0}-z)\}$ とおけば、S^1 上の非負整数値関数 Λ^z, N^z が得られる。(3.1)式と今のことから、

$$(3.2)\begin{cases} \lambda(\bar{C}_{ms_0+km_0}, f^k) = \sum_{\alpha^{s/s_0}=1} \sum_{\omega^{ms_0+km_0}=\alpha} \sum_{z^{mn_0+kk_0}=\alpha^{-1}} \Lambda^z(\omega) \\ \nu(\bar{C}_{ms_0+km_0}, f^k) = \sum_{\alpha^{s/s_0}=1} \sum_{\omega^{ms_0+km_0}=\alpha} \sum_{z^{mn_0+kk_0}=\alpha^{-1}} N^z(\omega) \end{cases}$$

を得る。関数 Λ^z, N^z は、以下の性質を持つ。

(3.3) 各 $z \in S^1$ に対して、$N^z(\omega) \neq 0$ となる点 $\omega \in S^1$ は、高々、2n個である。その点を、z に関する Poincaré points と呼ぶ。

(3.4) Λ^z は、z に関する Poincaré points を除いて、局所一定である。

(3.5) 各 z, ω_0 に対して、$\lim_{\omega\to\omega_0} \Lambda^z(\omega) \geq \Lambda^z(\omega_0)$。

(3.6)　$\ker(f_*^{s_0} - z) = \{0\}$ なる z に対しては，$\Lambda^z \equiv N^z \equiv 0$。

(3.2) 式と (3.4)，(3.5)，(3.6) より，以下の Lemma を得る。

Lemma 3.3.　各整数 l，$0 \leq l < s/s_0$ に対して，全ての $m \in D_l = \{m \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \mid mn_0 + k_0 \equiv l \mod s/s_0\}$ に対して，$\lambda(\bar{c}_{ms_0+m_0}, f) = 0$ であるか，そうでなければある正数 ε_l と a_l が存在して，

$$\lambda(\bar{c}_{m_1 s_0+m_0}, f) - \lambda(\bar{c}_{m_2 s_0+m_0}, f) \geq (m_1 - m_2)\varepsilon_l - a_l$$

が勝手な $m_i \in D_l$，$m_1 \geq m_2$，$i = 1, 2$ に対して，成り立つ。

(3.2) 式と (3.3)，(3.6) より次の重要な Lemma を得る。

Lemma 3.4.　各整数 l，$0 \leq l < s/s_0$，に対して，有限個の正整数 $k_1, \cdots, k_q$ と数列 m_j^i，$i > 0$，$j = 1, \cdots, q$，が決まり以下の性質を満たす。$\{m_j^i k_j\}$ は互いに異り，$\{m_j^i k_j \mid j = 1, \cdots, q, i > 0\} = \{ms_0 + m_0 \mid m \in D_l\}$ を満たしさらに，$\nu(\bar{c}_{m_j^i k_j}, f) = \nu(\bar{c}_{m_j^i k_j}, f \mid Fix(f^{s_0 s_j^i})) = \nu(\bar{c}_{k_j}, f^{\lambda} \mid Fix(f^{s_0 s_j^i}))$ を満たす。

ここで，s_j^i は，$(m_j^i, s_j^i) = 1$ で，s/s_0 の約数のうちで最大の整数を表わす。λ は，$\lambda \cdot m_j^i \equiv 1 \mod s_0 s_j^i$

を満たす整数である。 $\nu(\bar{c}_{\bar{m}}, f^{\bar{k}}|\mathrm{Fix}(f^{\bar{s}}))$ は critical orbit $S^1\cdot\bar{c}_{\bar{m}}$ の $\Omega(\mathrm{Fix}(f^{\bar{s}}), f^{\bar{k}}|\mathrm{Fix}(f^{\bar{s}}))$ 内における nullity を表わす。$\mathrm{Fix}(f^{\bar{s}})$ は $f^{\bar{s}}$ の不動点からなる集合で，M の compact, totally geodesic な submanifold になる。

これで主定理の証明の準備がほぼすんだ。証明の前に，必要な Cor. を2つあげておく。もし critical orbit $S^1\cdot\bar{c}_{m_j^i k_j}$ が孤立しているならば，Theorem 3.1の証明と同様な方法により，

$$\mathcal{H}^0(E^{f}_{\bar{c}_{m_j^i k_j}}, \bar{c}_{m_j^i k_j}) = \mathcal{H}^0(E^{f|\mathrm{Fix}(f^{s_0 s_j^i})}_{\bar{c}_{m_j^i k_j}}, \bar{c}_{m_j^i})$$

が成り立つ。また，Theorem 3.1 より，勝手な k に対して

$$\mathcal{H}^0_k(E^{f|\mathrm{Fix}(f^{s_0 s_j^i})}_{\bar{c}_{m_j^i k_j}}, \bar{c}_{m_j^i k_j}) \cong \mathcal{H}^0_k(E^{f^k|\mathrm{Fix}(f^{s_0 s_j^i})}_{\bar{c}_{k_j}}, \bar{c}_{k_j})$$

を得る。ここで，$\mathcal{H}^0(E^{f^{\bar{k}}|\mathrm{Fix}(f^{\bar{s}})}_{c}, c)$ は，$\Omega(\mathrm{Fix}(f^{\bar{s}}), f^{\bar{k}}|\mathrm{Fix}(f^{\bar{s}}))$ 上で定義されたエネルギー関数 $E^{f^{\bar{k}}|\mathrm{Fix}(f^{\bar{s}})}$ とその critical point c に対して定義された characteristic invariant を示す。上のことから，以下の corollary を得る。

<u>Corollary</u> 3.5. すべての critical orbits $S^1\cdot\bar{c}_{ms_0+m_0}$

, $m \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}$, は $\Omega(M, f)$ 内で孤立した critical orbits とする。その時、すべての k と $m \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}$ に対して、$B^0_k(\bar{c}_{m s_0 + m_0}, f) \leq B$ となる定数 B が存在する。さらに任意の $k > 2n$ と m に対して、$B^0_k(\bar{c}_{m s_0 + m_0}, f) = 0$ となる。

(2.1) 式と Lemma 3.3 より、

<u>Corollary</u> 3.6. Corollary 3.5 の仮定の下で、$B_k(\bar{c}_{m s_0 + m_0}, f)$ は一様に $2B$ で上からおさえられる。さらに、勝手な $k > 2n+1$ に対して、$B_k(\bar{c}_{m s_0 + m_0}, f) \neq 0$ なる critical orbits $S^1 \cdot \bar{c}_{m s_0 + m_0}$, $m \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\}$, の個数は、$k$ に依存しないある定数 C をこえない。

<u>Main theorem</u> 3.7. M を compact, simply connected なリーマン多様体とし、f を有限の order を持つ isometry とする。もし $C^0(M, f)$ の Betti 数のつくる数列が非有界ならば、f で不変な閉測地線は無限に存在する。

注、M は simply connected と仮定したから、$C^0(M, f)$ の各次元の Betti 数は有限である。([11])。

(証明) もし、f で不変な閉測地線が有限本しかないとすれば、有限個の $E^{f^{n_i}}$ の critical point c^i $(1 \leq i \leq r,$

$n_i \in \mathbb{Z}^+$）で $\Omega(M.f)$ 内の任意の nonconstant critical point は、ある i と m に対して、critical orbit $S^1 c^i{}_m$ 内に存在するように critical points c^i（$1 \leq i \leq r$）を選べる。Cor. 3.5 と 3.6 で決まった critical point c^i に対する定数を B^i, C^i とする。$\hat{B} = \max\{B^i ; 1 \leq i \leq r\}$, $\hat{C} = \sum_{i=1}^{r} C^i$ とおく。任意の $k > 2n+1$ に対して、$B_k(c^i{}_m, f) \neq 0$, なる critical orbits $S^1 c^i{}_m \in \Omega(M.f)$ の個数は $\hat{C}$ 以下である。Morse の不等式（(2.2)）より、勝手な regular values $a < b$ と k（$> 2n+1$）に対して、

$$b_k(\Omega^b, \Omega^a) \leq 2\hat{C}\hat{B}$$

となる。ここで $\Omega^b = \Omega^b(M.f)$ と書いた。a として、$0 < a < \min\{E^{f^{n_i}}(c^i) ; 1 \leq i \leq r\}$ と選べば、$Fix(f)$ は Ω^a の強変位レトラクト（[4]）だから、勝手な k に対して

$$b_k(\Omega^b, \Omega^a) = b_k(\Omega^b, Fix(f))$$

となる。$k > n+1$ なる k に対しては、$b_k(Fix(f)) = 0$ より勝手な $k (> 2n+1)$ に対して、（exact sequence より）

$$b_k(\Omega^b) = b_k(\Omega^b, Fix(f))$$

となる。k（$> 2n+1$）を勝手に選び、固定した時、十分大きな regular value b を選べば、Morse の不等式より、全ての regular value d ($\geq b$) に対して、

$$b_k(\Omega^d, \Omega^b) = b_{k+1}(\Omega^d, \Omega^b) = 0$$

となる。 故に、 $b_k(\Omega) = b_k(\Omega^b) = b_k(\Omega^b, Fix(f)) \leq 2\hat{C}\hat{B}$
となり、定理の仮定に反す。

Bibliography

[1] R.Bott, On the iteration of closed geodesics and the Sturm intersection theory, Comm.Pure Appl.Math. 9 (1956), 171-206.

[2] D.Gromoll, W.Meyer, Periodic geodesics on compact Riemannian manifolds, J.Differential geometry 3 (1969), 493-510.

[3] ________, On differentiable functions with isolated critical points, Topology 8 (1969), 361-369.

[4] K.Grove, Condition (C) for the energy integral on certain path-spaces and applications to the theory of geodesics, J.Differential Geometry 8 (1973), 207-223.

[5] ________, Isometry-invariant geodesics, Topology 13 (1974), 281-292.

[6] ________, Involution-invariant geodesics, Math.Scand.36 (1975), 97-108.

[7] K.Grove and M.Tanaka, On the number of invariant closed geodesics, to appear in Bull.Amer.Math.Soc. 82 (1976)

[8] M.Vigué-Poirrier and D.Sullivan, The homology theory of the closed geodesic problem, to appear in J.Differential geometry.

[9] M.Tanaka, On invariant closed geodesics under isometries, to appear in Kōdai Math.Sem.Rep.

[10] ________, Invariant closed geodesics under isometries of prime power order, to appear.

[11] J.P.Serre, Homologie singulière des espaces fibrès, Ann.of

Math. 54 (1951), 425-505.

[12] M.Morse, The calculus of variations in the large, Amer. Math.Soc.Colloq.Publ. vol. 18, (1934).