

Transverse Kähler structures on central foliations

鹿児島大学大学院・理工学研究科 石田 裕昭

Hiroaki Ishida

Graduate School of Science and Engineering

Kagoshima University

1 序

本稿では、大阪大学の糟谷久矢氏との共同研究 [3] の一部を概説する。この研究の目的の一つは、ケーラーとは限らないような複素多様体のドルボーコホモロジーあるいはドルボー複体を調べることである。ケーラーでないような複素多様体であって、おそらく最も簡単なものは Hopf 曲面だろう。ここでは、Hopf 曲面を例にとって説明を試みる。

α を $|\alpha| > 1$ を満たす複素数とし、 $\mathbb{C}^2 \setminus \{0\}$ への無限巡回群 \mathbb{Z} の作用を

$$k \cdot (z_1, z_2) := (\alpha^k z_1, \alpha^k z_2), \quad k \in \mathbb{Z}, (z_1, z_2) \in \mathbb{C}^2 \setminus \{0\}$$

によって定める。このとき、商空間 $(\mathbb{C}^2 \setminus \{0\})/\mathbb{Z}$ は自然に複素多様体になり、可微分多様体としては $S^1 \times S^3$ と微分同相になる。 $M := (\mathbb{C}^2 \setminus \{0\})/\mathbb{Z}$ はホップ曲面と呼ばれ、第一ベッチ数が 1 であり、特に奇数であることからケーラー構造を持たないことがわかる。

似たような構成を持つものとして、射影直線 $\mathbb{C}P^1$ がある。 $\mathbb{C}^2 \setminus \{0\}$ への代数トーラス $\mathbb{C}^* = \mathbb{C} \setminus \{0\}$ の作用を

$$g \cdot (z_1, z_2) := (gz_1, gz_2), \quad g \in \mathbb{C}^*, (z_1, z_2) \in \mathbb{C}^2 \setminus \{0\}$$

によって定めると、商空間 $\mathbb{C}P^1 := (\mathbb{C}^2 \setminus \{0\})/\mathbb{C}^*$ は 1 次元の複素多様体になり、特にケーラー多様体になる。

今、次の単射準同型によって \mathbb{Z} を \mathbb{C}^* の部分群だと思ふことにする： $\mathbb{Z} \ni k \mapsto \alpha^k \in \mathbb{C}^*$ 。このとき、 $\mathbb{C}^2 \setminus \{0\}$ 上の恒等写像は \mathbb{C}^*/\mathbb{Z} -主束 $M \rightarrow \mathbb{C}P^1$ を誘導する。 \mathbb{C}^*/\mathbb{Z} の M への自由作用および射影 $M \rightarrow \mathbb{C}P^1$ は正則である。

$H := \mathbb{C}^*/\mathbb{Z}$ は複素コンパクトトーラスであり、特に複素リー群である。 \mathfrak{h} を H のリー

環とする. H はコンパクトかつ M への作用は自由であるから, \mathfrak{h} に値を持つ M 上の 1-形式 $\theta \in \Omega^1(M) \otimes \mathfrak{h}$ であって, 次を満たすもの (接続と呼ばれる) が存在する:

1. $i_{X_v}\theta = v, \quad \forall v \in \mathfrak{h}.$
2. θ は H -同変.

\mathfrak{h} の \mathbb{R} 上の基底を v_1, v_2 とすると, θ は (\mathbb{R} に値を持つ) M 上の 1-形式 θ_1, θ_2 を用いて

$$\theta = \theta_1 \otimes v_1 + \theta_2 \otimes v_2$$

と書ける. $W \subset \Omega^1(M)$ を θ_1, θ_2 で張られる部分空間とする. このとき, まず M のドラム複体について

$$\begin{aligned} \Omega^*(M) &\simeq \Omega^*(M)^H \\ &= \Omega^*(\mathbb{C}P^1) \otimes \bigwedge W \\ &\simeq H^*(\mathbb{C}P^1) \otimes \bigwedge W \end{aligned}$$

が得られる. ここで, $A^* \simeq B^*$ は A^* と B^* は quasi-isomorphic であることを意味し, $\Omega^*(\mathbb{C}P^1)$ は引き戻しによって $\Omega^*(M)$ の部分代数と思っている. また, $W \otimes \mathbb{C}$ の元の $(1, 0)$ -部分の成す部分空間を $W^{1,0} \subset \Omega^{1,0}(M)$, $(0, 1)$ -部分の成す部分空間を $W^{0,1} \subset \Omega^{0,1}(M)$ とすると, M のドルポー複体について

$$\begin{aligned} \Omega^{*,*}(M) &\simeq \Omega^{*,*}(M)^H \\ &= \Omega^{*,*}(\mathbb{C}P^1) \otimes \bigwedge (W^{0,1} \oplus W^{1,0}) \\ &\simeq H^{*,*}(\mathbb{C}P^1) \otimes \bigwedge (W^{0,1} \oplus W^{1,0}) \end{aligned}$$

が得られる. 結果として, Hopf 曲面 M が $\mathbb{C}P^1$ 上のトーラス主束の全空間であることを用いて, M の有限次元ドラムモデル $H^*(\mathbb{C}P^1) \otimes \bigwedge W$ と, 有限次元ドルポーモデル $H^{*,*}(\mathbb{C}P^1) \otimes \bigwedge (W^{0,1} \oplus W^{1,0})$ を構成することができた.

2 Canonical and central foliations

ここからは, M はコンパクトかつ連結な複素多様体とする. このとき, M の自己同型写像, つまり M から M 自身への双正則写像全体 $\text{Aut}(M)$ は複素リー群をなすことが知られている ([1]). M 上の正則ベクトル場全体 $\mathfrak{X}(M)$ は複素リー代数をなし, 各正則ベクトル場に対してその実部を対応させる写像は, $\mathfrak{X}(M)$ と $\text{Aut}(M)$ のリー代数との間の同型を与える. これによって, $\text{Aut}(M)$ のリー代数と $\mathfrak{X}(M)$ を同一視することにする.

T を $\text{Aut}(M)$ の極大コンパクトトーラスとし, \mathfrak{t} を T のリー代数とする. \mathfrak{t} は $\mathfrak{X}(M)$ の (実) 部分代数である. \mathfrak{h}_M を \mathfrak{t} に含まれる複素部分代数のうち最大のもの, すなわち

$$\mathfrak{h}_M = \mathfrak{t} \cap J\mathfrak{t}, \quad J \text{ は } \mathfrak{X}(M) \text{ の複素構造}$$

とする. \mathfrak{h}_M の指数写像による像 $H_M := \exp(\mathfrak{h}_M) \subset \text{Aut}(M)$ は, 複素リー部分群である (閉とは限らない).

命題. 次が成り立つ:

1. \mathfrak{h}_M は $\mathfrak{X}(M)$ の中心に含まれる.
2. \mathfrak{h}_M は極大コンパクトトーラス T の取り方によらない.
3. H_M の M への自然な作用は局所自由である.

定義. \mathcal{F} を M 上の葉層構造とする.

1. ある複素部分代数 $\mathfrak{h} \subset \mathfrak{h}_M$ が存在して, \mathcal{F} の各葉が $H := \exp(\mathfrak{h})$ の軌道であるとき, \mathcal{F} を M の central foliation という.
2. 特に $\mathfrak{h} = \mathfrak{h}_M$ のとき, \mathcal{F} を M の canonical foliation という.

定義. \mathcal{F} を M 上の葉層構造とする. M 上の 2-形式 $\omega \in \Omega^2(M)$ が \mathcal{F} に関して横断シンプレクティック構造であるとは, 次を満たすことをいう:

1. $d\omega = 0$.
2. $p \in M$ に対し, $\ker \omega_p = T_p\mathcal{F}$.

定義. \mathcal{F} を M 上の正則葉層構造とし, ω は \mathcal{F} に関して横断シンプレクティック構造であるとする. このとき, ω が \mathcal{F} に関して横断ケーラー構造であるとは, 次を満たすことをいう: $p \in M$ と $X, Y \in T_pM$ に対し,

1. $\omega_p(JX, JY) = \omega_p(X, Y)$,
2. $\omega_p(JX, X) \geq 0$.

横断ケーラー構造や central foliation の例については, [2] などを見よ.

3 結果

非コンパクトな連結リー群が (局所) 自由に多様体に作用しているとき, 一般には接続が存在するかどうかはわからない. しかしながら前節で構成した H_M の M への作用に関し

ては次が言える:

命題. M 上の任意の central foliation \mathcal{F} に対して, 接続が存在する. すなわち, 任意の複素部分代数 $\mathfrak{h} \subset \mathfrak{h}_M$ に対し, \mathfrak{h} に値を持つ M 上の 1-形式であって

1. $i_{X_v}\theta = v, \quad \forall v \in \mathfrak{h},$
2. θ は $H(= \exp(\mathfrak{h}))$ -同変

を満たすものが存在する.

M 上の central foliation \mathcal{F} の接続 θ と \mathfrak{h} の (実ベクトル空間としての) 基底 v_1, \dots, v_k を固定する. このとき, $\theta \in \Omega^1(M) \otimes \mathfrak{h}$ は $\theta_1, \dots, \theta_k \in \Omega^1(M)$ を用いて

$$\theta = \theta_1 \otimes v_1 + \dots + \theta_k \otimes v_k$$

と書ける.

ドラーム複体 $\Omega^*(M)$ の部分複体

$$\Omega_{\text{basic}}^*(M) := \{\alpha \in \Omega^*(M) \mid i_{X_v}\alpha = 0, L_{X_v}\alpha = 0, \forall v \in \mathfrak{h}\}$$

を basic 複体といい, そのコホモロジー $H_{\text{basic}}^*(M)$ を basic コホモロジーという. 同様に, basic ドルボー複体および basic ドルボーコホモロジーが定義される.

定理. $\alpha \in \Omega_{\text{basic}}^{\dim M - \dim \mathcal{F}}(M)$ に対して, $\alpha \wedge \theta_1 \wedge \dots \wedge \theta_k \in \Omega^{\dim M}(M)$ を対応させる写像は同型 $H_{\text{basic}}^{\dim M - \dim \mathcal{F}}(M) \cong H^{\dim M}(M)$ を誘導する. 特に $H_{\text{basic}}^{\dim M - \dim \mathcal{F}}(M) \cong \mathbb{R}$.

前と同じように, $W \subset \Omega^1(M)$ を $\theta_1, \dots, \theta_k$ で張られる部分空間とし, $W \otimes \mathbb{C}$ の元の $(1, 0)$ -部分の成す部分空間を $W^{1,0} \subset \Omega^{1,0}(M)$, $(0, 1)$ -部分の成す部分空間を $W^{0,1} \subset \Omega^{0,1}(M)$ とする.

定理. 次の quasi-isomorphism がある:

1. $\Omega^*(M) \simeq \Omega_{\text{basic}}^*(M) \otimes \wedge W.$
2. $\Omega^{*,*}(M) \simeq \Omega_{\text{basic}}^{*,*}(M) \otimes \wedge(W^{1,0} \oplus W^{0,1}).$

\mathcal{F} に関して横断的にケーラーであるならば, 次の有限次元モデルを得ることができる:

定理. M が \mathcal{F} に関して横断的にケーラーであるならば, 次の quasi-isomorphism がある:

1. $\Omega^*(M) \simeq H_{\text{basic}}^*(M) \otimes \wedge W.$
2. $\Omega^{*,*}(M) \simeq H_{\text{basic}}^{*,*}(M) \otimes \wedge(W^{1,0} \oplus W^{0,1}).$

参考文献

- [1] S. Bochner and D. Montgomery, *Locally compact groups of differentiable transformations*, Ann. of Math. (2) **47** (1946), 639–653.
- [2] H. Ishida, *Torus invariant transverse Kähler foliations*, Trans. Amer. Math. Soc. **369** (2017), 5137–5155.
- [3] H. Ishida and H. Kasuya, *Transverse Kähler structures on central foliations of complex manifolds*, arXiv:1610.00847.