

Bibliography

[Rud] W. Rudin. *Functional analysis*. 2nd edn. International Series in Pure and Applied Mathematics. McGraw-Hill, Inc., New York. (1991.)

[NO] J. Noguchi, T.Ochiai *Geometric Function Theory in Several Complex Variables* Translations of Mathematical Monographs Volume: 80; 1990; 282 pp

^{NO} [NO, Chapter 3] を参考にしている。

0.1 Current

0.1.1 current

M 2nd countable 次元 C^∞ 級多様体とする。

Recall $M \subset \mathbb{R}^m$ の時 $C^\infty(M)$ には次の位相を次で入れていた。

$K_1 \subset K_2 \subset \dots \subset M$ というコンパクト集合であって

$$K_i \subset K_{i+1}^\circ \quad \text{and} \quad M = \bigcup K_i^\circ$$

となるものを一つ固定し, $f \in C^\infty(M)$ について, $N \in \mathbb{Z}_+$ として

$$P_N(f) := \max\{|D^\alpha f(x)| \mid |\alpha| \leq N \& x \in K_N\}$$

$$V_N := \max\{f \in C^\infty(M) \mid P_N(f) < \frac{1}{N}\}$$

を 0 の open base とするような位相を入れていた。

$K \subset M$ コンパクトに対して

$$\mathcal{D}_K(M) := \{\phi \in C^\infty(M) \mid \text{Supp}(\phi) \subset K\} \subset C^\infty(M)$$

に対して相対位相を入れて

$$\mathcal{D}(M) := \bigcup_{K \subset M | K \text{ cpt}} \mathcal{D}_K(M) \cong \varinjlim_K \mathcal{D}_K(M)$$

この colimit は locally convex vector space での colimit である.

lem-E-1

Lemma 0.1.1. 1. $U, U' \subset \mathbb{R}^m$ を開集合とする. $U \cong U'$ を微分同相とする時, $C^\infty(U) \cong C^\infty(U')$ である. ここでこの同型は位相 \mathbb{C} ベクトル空間の同型である
2. $M \subset \mathbb{R}^m$ 開集合とし, $M = \bigcup U_i$ を可算個の開被覆とする時

$$C^\infty(M) \hookrightarrow \prod C^\infty(U_i) \quad f \mapsto \{f|_{U_i}\}$$

とすると, $C^\infty(M)$ の位相はこの直積位相 $\prod C^\infty(U_i)$ によって引き起こされる位相となる. 特に

$$C^\infty(M) \cong \text{Eq}(\prod C^\infty(U_i) \rightrightarrows \prod C^\infty(U_i \cap U_j))$$

という位相 \mathbb{C} ベクトル空間の同型を得る.

Proof. (1). 以下 $K_1 \subset K_2 \subset \dots \subset U$ というコンパクト集合で $C^\infty(U)$ の位相を誘導するものを一つ固定する. $\Phi : U' \rightarrow U, (x_1, \dots, x_m) \mapsto (y_1, \dots, y_m)$ を微分同相写像とする. すると $K'_i := \Phi(K_i)$ によって, $C^\infty(U')$ の位相を誘導する. V_N, V'_N を上の通りとする.

さてその引き戻し

$$\Phi^* : C^\infty(U) \rightarrow C^\infty(U') \quad f(y) \mapsto f \circ \Phi(x) = f(y(x))$$

が位相 \mathbb{C} ベクトル空間の同型を誘導することを示す.

$f \in C^\infty(U)$ について chain rule より, $|\alpha| \leq N'$ について

$$D_x^\alpha f \circ \Phi(x) := \sum_{|\beta| \leq N'} (D_y^\beta f)(y(x)) \cdot \Phi_{\alpha\beta}(x) \tag{0.1.1}$$

である.

Φ が 0 の近傍で連続であることを示せば良い. 任意の N' について, $K_{N'}$ コンパクトなので, $K_{N'}$ 上では $|\Phi_{\alpha\beta}(x)| \leq C_{N'}$ となる $C_{N'}$ が取れる. よって $N' \cdot \frac{1}{N} \cdots C_{N'} < \frac{1}{N'}$ となる N をとれば, $f \circ \Phi \in \Phi^*(V_N)$ について

$$|D_x^\alpha f \circ \Phi(x)| \stackrel{\substack{\text{eq-lem-E-1} \\ (0.1.1)}}{=} \underbrace{\sum_{|\beta| \leq N} |(D_y^\beta f)(y(x))|}_{< \frac{1}{N}} \cdot |\Phi_{\alpha\beta}(x)| \leq N' \cdot \frac{1}{N} \cdot C_{N'} < \frac{1}{N}$$

よって「任意の $N' > 0$ について, ある $N > 0$ があって, $\Phi^*(V_N) \subset V'_{N'}$ である」ため Φ は 0 の近

傍で連続である.

(2) $M = \bigcup_{i=1}^{\infty} U_i$ とする. 各 U_i で

$$K_{i1} \subset K_{i2} \subset \cdots \subset U_i$$

で $U_i = \bigcup_j K_{ij}^\circ$ となるコンパクト列をとる. そこで $K_N := \bigcup_{i=1}^N K_{i,N}$ とすると

$$K_1 \subset K_2 \subset \cdots \subset M$$

であって, $K_i \subset K_{i+1}^\circ$ かつ $M = \bigcup K_i^\circ$ となる.

さて $\prod C^\infty(U_i)$ の 0 での local base は

$$\{V_{\mathbf{i}, \mathbf{N}} := V_{i_1, N_{i_1}} \times V_{i_2, N_{i_2}} \times \cdots \times V_{i_l, N_{i_l}} \times \prod_{i \neq i_k} C^\infty(U_i) \mid i_1 < i_2 < \cdots < i_l, N_{i_k} \in \mathbb{Z}_+\}$$

となる形のものである. ここで

- $\mathbf{i} := (i_1, i_2, \dots, i_l), \mathbf{N} := (N_{i_1}, N_{i_2}, \dots, N_{i_l})$ と定める.
- $V_{\mathbf{i}, \mathbf{N}} := \{f \in C^\infty(U_i) \mid P_N(f) < \frac{1}{N}\}$ である (この定義での $P_N(f)$ には $K_{i,N}$ をつかう.)

一方で $V_N := \{f \in C^\infty(M) \mid P_N(f) < \frac{1}{N}\}$ (この定義での $P_N(f)$ には $K_{i,N}$ をつかう.) であり, これは $C^\infty(M)$ の 0 での local base である. 以上より, 次の二つを示せば良い.

- 任意の \mathbf{i}, \mathbf{N} について, ある N があって, $V_N \subset V_{\mathbf{i}, \mathbf{N}} \cap C^\infty(M)$ が成り立つ.
- 任意の N について, ある \mathbf{i}, \mathbf{N} があって, $V_N \supset V_{\mathbf{i}, \mathbf{N}} \cap C^\infty(M)$ が成り立つ.

$$\begin{aligned} V_N &:= \left\{ f \in C^\infty(M) \mid x \in K_N := \bigcup_{i=1}^N K_{i,N}, |\alpha| \leq N, |D_\alpha f(x)| < \frac{1}{N} \right\} \\ &\stackrel{\text{def}}{=} \left(V_{1,N} \times V_{2,N} \times \cdots \times V_{N,N} \times \prod_{i>N} C^\infty(U_i) \right) \cap C^\infty(M) \\ &\stackrel{\text{def}}{=} V_{(1,2,\dots,N),(N,\dots,N)} \cap C^\infty(M) \end{aligned}$$

である. これより二つ目の主張が正しいことがいえる. 一つ目の主張は任意の \mathbf{i}, \mathbf{N} について,

$$V_{\max\{\mathbf{i}, \mathbf{N}\}} \subset V_{\mathbf{i}, \mathbf{N}} \cap C^\infty(M)$$

なので言える. □

defn-E-2

Definition 0.1.2. M 2nd countable 次元 C^∞ 級多様体とする. $C^\infty(M)$ に位相を次のように入れる.

まず $M = \bigcup_{i=1}^{\infty} U_i$ で $U_i \subset \mathbb{R}^m$ となる countable open cover を一つ固定する. そして,

$$C^\infty(M) \hookrightarrow \prod_i C^\infty(U_i) \quad f \mapsto (f|_{U_i})$$

による部分位相を $C^\infty(M)$ に入る. つまり,

$$C^\infty(M) \cong \text{Eq}(\prod_i C^\infty(U_i) \rightrightarrows \prod_i C^\infty(U_i \cap U_j))$$

となるように入る.

Remark 0.1.3. [defn-E-2](#) による位相の定義において, U_i の取り方によらない.

Proof. 別の U'_j をとると細分 $U_i \cap U'_j$ が取れる. よって次の図式が考えられる.

$$\begin{array}{ccccc} C^\infty(M) & \xhookrightarrow{\quad} & \prod C^\infty(U_i) & \xhookrightarrow{\quad} & \\ \swarrow & & \searrow & & \downarrow \\ \prod C^\infty(U'_j) & \xhookrightarrow{\quad} & \prod C^\infty(U_i \cap U'_j) & \xhookrightarrow{\quad} & \end{array}$$

そこで”相対位相の直積は相対位相になる”ので, [0.1.1](#) より言える. □

これにより

$$C^\infty : (U \underset{\text{open}}{\subset} M) \mapsto C^\infty(U)$$

は \mathbb{C} ベクトル空間の sheaf となる. よって $K \subset M$ に対して

$$\mathcal{D}_K(M) := \{\phi \in C^\infty(M) \mid \text{Supp}(\phi) \subset K\}$$

として $C^\infty(M)$ の部分位相を入れる.

$$\mathcal{D}(M) := \bigcup_{K \subset M \mid K \text{ cpt}} \mathcal{D}_K(M) \cong \varinjlim_K \mathcal{D}_K(M)$$

この colimit は locally convex vector space での colimit である.

[指摘] この colim は存在する? やっぱり Section 1 でやったような位相の入れ方にもう一回戻る?
 $\varinjlim_K \mathcal{D}_K(M)$ については次回再考.

0.1.2 current 続き

以下^{NO}[NO] の記法に合わせる. (M 2nd countable m 次元 C^∞ 級多様体, $k \in \mathbb{Z}_+$ とする.)¹

- $C(M) := \{ f : M \rightarrow \mathbb{C} ; \text{連続} \}$
- $\mathcal{E}(M) := \{ f : M \rightarrow \mathbb{C} ; C^\infty\text{-関数} \}$ 普通は” $C^\infty(M)$ ”である.
- $C^k(M) := \{ \varphi : k\text{-forms on } M \text{ with coeff } \in C \}$ つまり locally に

$$\varphi = \sum_J \varphi_J d\bar{z}^J \quad (d\bar{z}^J = d\bar{z}^{j_1} \wedge \cdots \wedge d\bar{z}^{j_k})$$

とかけるものとする. ここで $(U; z^1, \dots, z^n)$ を局所座標とし, $J = (j_1, \dots, j_k)$, $\varphi_J \in C(U)$ とする. 特に $C^0(M) = C(M)$.

- $\mathcal{E}^k(M) := \{ \varphi : k\text{-forms on } M \text{ with coeff } \in \mathcal{E} \}$ 普通は” $\mathcal{A}^k(M)$ ”である.
- $\mathcal{K}^k(M) := \{ \varphi \in C^k(M) \mid \text{supp } \varphi \text{ cpt} \}$ ここで $\text{Supp } \varphi := \overline{\{x \in M, \varphi(x) \neq 0\}}$ である.
 $\varphi(x) \neq 0$ とはある J があって, $\varphi_J(x) \neq 0$ であることを意味する.
- $\mathcal{D}^k(M) := \{ \varphi \in \mathcal{E}^k(M) \mid \text{supp } \varphi \text{ cpt} \}$
- $A \subset M$ について以下のようにおく

$$\mathcal{K}_A^k(M) := \{ \varphi \in \mathcal{K}^k(M) \mid \text{supp } \varphi \subset A \} \quad \mathcal{D}_A^k(M) := \{ \varphi \in \mathcal{D}^k(M) \mid \text{supp } \varphi \subset A \}$$

	連続	C^∞
関数	$C(M)$	$\mathcal{E}(M)$
form	$C^k(M)$	$\mathcal{E}^k(M)$
form with support compact	$\mathcal{K}^k(M)$	$\mathcal{D}^k(M)$
form with support $\subset A$	$\mathcal{K}_A^k(M)$	$\mathcal{D}_A^k(M)$

Recall

$U \subset \mathbb{R}^m$ open のとき、 $C(U)$, $\mathcal{E}(U)$ には次のような 位相をいれていた.

コンパクト集合の列: $K_1 \subset K_2 \subset \cdots \subset U$ で $K_j \subset K_{j+1}^\circ$ かつ $U = \bigcup_j K_j^\circ$ となるものを取り、 $f \in \mathcal{E}(U)$ に対し

$$P_N(f) := \max \left\{ |D^\alpha f(x)| \mid x \in K_N, |\alpha| \leq N, \omega \in K_N \right\}$$

$$V_N := \left\{ f \in \mathcal{E}(U) \mid P_N(f) < \frac{1}{N} \right\}$$

を open base at 0(0 での開基) とする位相を入れていた.

¹おそらく通常の記法とかなり違う記法であると思われる.

lem-E-1 **0.1.1**により、これがコンパクト集合の列や座標近傍 $U \subset \mathbb{R}^m$ によらない

一般の多様体に関しては M に対しては、 $M = \bigcup_j U_j$ という座標近傍の被覆を使って

$$\mathcal{E}(M) \subset \prod \mathcal{E}(U_j)$$

部分位相を入れた。

defn-E-3

Definition 0.1.4. $U \subset \mathbb{R}^m$ open に対し、 $C^k(U)$, $\mathcal{E}^k(U)$ に対して位相を

$$\mathcal{E}^k(U) \simeq \prod_{J=(j_1 < \dots < j_k)} \mathcal{E}(U) d\bar{z}^J$$

による直積位相を入れる。

これは次のノルム

$$P_N(\varphi) := \max \left\{ |D^\alpha \varphi_J(x)| \mid x \in K_N, |\alpha| \leq N, \omega \in K_N \right\}$$

について、 $\mathcal{E}(U)$ と同じように位相を入れたものに一致する。

lem-E-4

Lemma 0.1.5. 1. $U \subset \mathbb{R}^m$, $U' \subset \mathbb{R}^m$ open について、 $\Phi : U' \rightarrow U$ が diffeo のとき

$$\Phi^* : \mathcal{E}^k(U) \xrightarrow{\sim} \mathcal{E}^k(U')$$

が \mathbb{C} 上の位相ベクトル空間の同型を誘導する。

2. $U \subset \mathbb{R}^m$ open, $U = \bigcup_j U_j$: countable open cover について,

$$\mathcal{E}^k(U) \hookrightarrow \prod_j \mathcal{E}^k(U_j)$$

は部分位相空間となる。

Proof. (1) $\Phi : U'(x^1, \dots, x^m) \rightarrow U(y^1, \dots, y^m)$ diffeo として

$$\Phi^* : \mathcal{E}^k(U) := \prod_J \mathcal{E}(U) dy^J \longrightarrow \mathcal{E}^k(U') := \mathcal{E}(U') dx^I$$

は以下のような形になる。

$$\varphi = \sum_J \varphi_J dy^J \longmapsto \sum_I \left(\sum_J \Phi^* \varphi_J \frac{\partial y^J}{\partial x^I} \right) dx^I$$

となる. ここで

$$\frac{\partial y^J}{\partial x^I} = \det\left(\frac{\partial y^{j_k}}{\partial x^{i_l}}\right)$$

とする. よって [Lemma E-1](#) で $\varphi_J \mapsto \Phi^*\varphi_J$ が連続であることを言っており, 和をとるのも連続なので, 連続性が言える.

(2) :

$$\prod_I \mathcal{E}(U) dx^I \cong \mathcal{E}^k(U) \hookrightarrow \prod_i \mathcal{E}^k(U_i) \stackrel{(1)}{\cong} \prod_i \left(\prod_I \mathcal{E}(U) dz^I \right) \cong \prod_I \left(\prod_j \mathcal{E}(U_j) dz^I \right)$$

となる. [Lemma E-1](#) でから, $\mathcal{E}(U) \subset \prod_j \mathcal{E}(U_j)$ が部分位相になっているのでいえた. \square

defn-E-5

Definition 0.1.6. M 2nd countable m 次元 C^∞ 級多様体について $C^k(M)$, $\mathcal{E}^k(M)$ に次のように位相を入れる:

$M = \bigcup U_j$ を座標近傍 U_j の countable covering とし,

$$\mathcal{E}^k(M) \hookrightarrow \prod_j \mathcal{E}^k(U_j)$$

による部分位相を入れる.

$A \subset M$ compact subset について, $\mathcal{D}_A^k(M) \subset \mathcal{E}^k(M)$ は closed subspace である.(下の remark 参照) $\mathcal{D}_A^k(M)$ には $\mathcal{E}^k(M)$ の subtopology ををいれる
 $\mathcal{K}^k(M)$, $\mathcal{D}^k(M)$ には、

$$\mathcal{B} := \left\{ W \subset \mathcal{D}^k(M) ; W = \text{non-empty convex balanced} \right. \\ \left. \text{s.t. } \forall A \subset M \text{ cpt, } W \cap \mathcal{D}_A^k(M) \text{ is open in } \mathcal{D}_A^k(M) \right\}$$

を 0 の local base となる位相を入れる.

Remark 0.1.7. [Lemma E-1](#) から $\mathcal{E}^k(M)$ の位相は座標近傍の $\{U_j\}$ の取り方に依らない. さらにこの位相は

$$\mathcal{E}^k(M) \rightarrow \mathcal{E}^k(U) \quad | \quad U \subset M \text{ loc. coord.}$$

に関する weak top. である (weak topology に関しては [??](#) 参照)

$\mathcal{D}_A^k(M) \subset \mathcal{E}^k(M)$ は closed subspace なのは $x \in U \subset M$ loc coord. に対し, 代入写像

$$ev_x \mathcal{E}^k(M) \rightarrow \mathbb{C}^{\oplus J} \quad \varphi \longmapsto (\varphi(x))_J$$

が連続で, $\mathcal{D}_A^k(M) = \bigcap_{x \in M \setminus A} \text{Ker}(e)v_x$ とかけるので closed subspace になる.

$\mathcal{K}^k(M)$, $\mathcal{D}^k(M)$ の位相を詳しくいうと, [??](#) のように, 集合族 τ を, ” $\bigcup_{i \in I} (\varphi_i + W_i)$ とかけるもの”

の集まりとする。ただし $i \in I$ について, $\varphi_i \in \mathcal{D}^k(M)$, $W_i \in \beta$ とする。

dom	local ($U \subset \mathbb{R}^n$)	global (M mfd.)
form	$C^k(U)$, $\mathcal{E}^k(U)$	$C^k(M)$, $\mathcal{E}^k(M)$
form support $\subset A$	$K_A^k(U)$, $D_A^k(U)$	$K_A^k(M)$, $D_A^k(M)$
form support compact	$K^k(U)$, $D^k(U)$	$K^k(M)$, $D^k(M)$

という対応がある。

prop-E-6

Proposition 0.1.8. M 2nd countable 次元 C^∞ 級多様体について以下が成り立つ。

- $\mathcal{E}^k(M)$, $D_A^k(M)$ locally convex, complete metrizable 位相 \mathbb{C} ベクトル空間 Heine-Borel property.
- $C^k(M)$, $K_A^k(M)$ locally convex, complete, metrizable 位相 \mathbb{C} ベクトル空間.

Proof. $k = 0$, $M = \bigcup_{i=1}^{\infty} U_i \subset \mathbb{R}^m$ などに関してはすでに示している

Prop-M-7.3 によって $\mathcal{E}^0(U) = C^\infty(U)$ について, コンパクト集合の列 $K_1 \subset K_2 \subset \dots$ であって, seminorm の separating family

$$P_N(f) = \max\{|D^\alpha f(x)| ; x \in K_N, |\alpha| \leq N\}$$

によって位相を入れると, metrizable 位相 \mathbb{C} ベクトル空間であることがわかる。(ここに open cover が countable がいる)

また Prop-M-7.4 で complete と Heine-Borel property を示した。(ここに平均値の定理を使う。つまり微分可能性がいる。) よって $C(U)$ しても同じで, Heine-Borel property 以外は 同様にできる。

$k > 0$, $\mathcal{E}^k(U)$, $C^k(U)$ に関しては, seminorm を

$$P_N(\varphi) := \max\left\{ |D^\alpha \varphi_J(x)| \mid x \in K_N, J = (j_1 < \dots < j_k), |\alpha| \leq N \right\}$$

に変えれば同様に言える

$\mathcal{E}^k(M)$, $C^k(M)$ に関しては 前回 Lem-E-1(2) で与えられたコンパクト集合の列をとる。具体的に ($M = \bigcup U_j$ とし $K_{i1} \subset K_{i2} \subset \dots \subset U_i$ となるコンパクト集合列について

$$K_N := \bigcup_{i=1}^N K_{i,N}$$

$$P_N(\varphi) := \max\left\{ |D^\beta \varphi_J(x)| \mid x \in K_{iN} \subset U_i, J = (j_1 < \dots < j_k), |\omega| \leq N \right\}$$

とすると $K_1 \subset K_2 \subset \dots \subset M$ であり, 同様の議論が回る。

$K_A^k(M)$, $D_A^k(M)$ は それぞれ $C^k(M)$, $\mathcal{E}^k(M)$ の閉部分空間なので, 諸性質は保たれる.

□

Proposition 0.1.9. (cf. ^[thm-M-8.7] [??])

- (a) $V \subset D^k(M)$ convex balanced について, V が open であることは, 任意の compact $A \subset M$ について, $V \cap D_A^k(M) \subset D_A^k(M)$ であることと同値.
- (b) $A \subset M$ compact としたとき, $D_A^k(M) \subset D^k(M)$ 部分位相空間.
- (c) $E \subset D^k(M)$ bounded ならば, ある compact $A \subset M$ であって, $E \subset D_A^k(M)$ となる.
- (d) $D^k(M)$ は Heine-Borel property を持つ.
- (e) $D^k(M) \cong \text{colim}_{A \subset M \text{ cpt}} D_A^k(M)$. ここでこの同型は locally convex 位相 \mathbb{C} ベクトル空間としての同型である.

また上の主張は D_A を K_A に変えても成り立つ.

(a). [??] が $D^k(M)$ でも言える ([??] (a) の議論が回る)

[(b)] $D_A^k(M) \hookrightarrow D^k(M)$ は, (a) より連続である.

一方, $D^k(M) \hookrightarrow \mathcal{E}^k(M)$ も 連続である. なぜならば $\mathcal{E}^k(M)$ は locally convex より, convex balanced な open base at 0 となるものがある. それらをひとつ取っても convex balanced であり, 各 $D_A^k(M)$ に制限しても open なので, $D^k(M)$ の上で open となる. □