

On versality for unfoldings of smooth section-germs.

奈良女子大学理学部 泉屋 周一

Shyūichi Izumiya
Department of Math.
Nara womens Univ.

ABSTRACT : Let \mathcal{C} be a category. We shall say that an object $V \in \mathcal{C}$ is versal if there is a morphism $\phi \in \text{HOM}(0, V)$ for any object $0 \in \mathcal{C}$.

There is a problem to characterize the versal object in various categories.

In this article, we consider the problem for the category of unfoldings of smooth section-germs. The main theorem is the following :

THEOREM. Let $(\Gamma_E^\Lambda(n), \mathcal{G}_E(n), R(n))$ be an essential triple. We suppose that $\dim_{\mathbb{R}} \langle C_0^\Lambda(\mathbb{R}^n, V) \rangle_{R(n)} / C_0^\Lambda(\mathbb{R}^n, V) + T_\sigma^\mathcal{G}(\theta_E^\mathcal{G}(n)) < \infty$.

If Σ is an infinitesimally versal Λ -unfolding of $\sigma \in \Gamma_E^\Lambda(n)_0$, then Σ is versal.

As applications of this theorem, we have versality theorems for C^∞ -map-germs (Martinet [4], Mather [5], Zakalyukin [9]), G-equivariant map-germs (Poenaru [7]), and solutions of a linear partially differential equations (Example A-5).

§0 序節

カテゴリ \mathcal{C} において, object $V \in \mathcal{C}$ が versal object であるとは, 任意の object $O \in \mathcal{C}$ に対して, morphism $\Phi \in \text{Hom}(O, V)$ が存在する時に言う. 様々なカテゴリにおいて versal object を特徴づけることが 1 つの問題としてある. 近年, smooth map-germs の間の種々の同値関係に対応する unfoldings のカテゴリにおいて "versality theorem" が証明された ([4], [5], [9]). 一方, smooth vector-field-germs の smooth equivalent に対応する unfoldings のカテゴリの様に "versality theorem" が成立しない例が知られている ([1]). この小論の目的は, これらを vector 束の smooth section-germs としてつかまえて, どのような場合に "versality theorem" が成立するかを特徴づける事にある. 我々の主要定理によると, 上記の諸定理が得られるばかりでなく, G -invariant function-germs の G -unfoldings ([7]), や線型偏微分方程式の解としてあらわされる smooth section-germs (ie. 調和函数等) の種々の同値関係に対応する unfoldings 等のカテゴリにおける "versality theorem" が応用例として得られる.

§1 定義と主要定理

M を C^∞ -manifold, $E(M)$ を fibre として $V(M)$ を M 上の C^∞ -vector bundle とする. $\Gamma_E^\infty(M)$ で $E(M)$ の local smooth

 (2)

section全体の集合をあらわし, $\Gamma_E^\wedge(M)$ をその subset とする.
次に, $\mathcal{D}(M)$ で M 上の local diffeo 全体のつくる pseudo group を表わす.

定義 1.1. $\mathcal{G}_E(M)$ が essential sub pseudogroup of
 $\mathcal{D}(M) \times \mathcal{D}(E(M))$ であるとは, 次の 2 条件を満足する事と定義
する: i) $\mathcal{G}_E(M)$ は $\mathcal{D}(M) \times \mathcal{D}(E(M))$ の sub pseudogroup である.
ii) $\mathcal{G}_E(M)$ の任意元 (h, H) において, H は h を cover する
 $E(M)$ の local smooth fibre bundle automorphism である.

さて, この時, 我々は $\Gamma_E^\wedge(M)$ の元の germs に対して \mathcal{G}_E -
equivalent という概念を定義することが出来る.

定義 1.2. $\nu: (M, a) \rightarrow (E(M), b)$ と $\nu': (M, a') \rightarrow (E(M), b')$ を
 $\Gamma_E^\wedge(M)$ の元を代表元として ν, ν' を $E(M)$ の smooth section-germs と
する. この時, ν と ν' が \mathcal{G}_E -equivalent であるとは次の条件を
満足する事と定義する: $\mathcal{G}_E(M)$ の元 (h, H) が $h(a) = a'$
 $H(b) = b'$ を満足するものが存在して, a における germ として
 $H \circ \nu = \nu' \circ h$ が成立する.

我々はこの \mathcal{G}_E -equivalence に対応して $\Gamma_E^\wedge(M)$ に値を ν 様は
unfoldings のカテゴリ-を構成することが出来るが, 今後 ν 様
を germs の話となるので, $M = \mathbb{R}^n$ として, ν 様を原点にお
ける germs に話をかぎります.

NOTATION: $\Gamma_E^\wedge(M) \equiv \{ \nu \mid \nu: (\mathbb{R}^n, 0) \rightarrow E(\mathbb{R}^n) : \text{germ of} \}$
(3)

elements in $\Gamma_{\mathbb{E}}^{\wedge}(\mathbb{R}^m)$ at 0 }.

$$\Gamma_{\mathbb{E}}^{\wedge}(m)^0 \equiv \{ \nu \in \Gamma_{\mathbb{E}}^{\wedge}(m) \mid \nu(0) = 0 \in \mathbb{R}^m \times V(\mathbb{R}^m) \cong E(\mathbb{R}^m) \}.$$

$\mathcal{G}_{\mathbb{E}}(m) \equiv \{ (R, H) \mid (R, H): \text{germ of elements in } \mathcal{G}_{\mathbb{E}}(\mathbb{R}^m) \text{ at } 0 \text{ with } (R(0), H(0)) = (0, 0) \in \mathbb{R}^m \times E(\mathbb{R}^m) \}.$

次に, $\Gamma_{\mathbb{E}}^{\wedge}(m)$ に値をもつ unfoldings を定義する.

定義 1.3. $\Gamma_{\mathbb{E}}^{\wedge}(m)^0 \ni \nu$ に対して, smooth map-germ $\Sigma: (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^k, (0, 0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ が ν の k次元 \wedge -unfolding であるとは, 次の条件を満足する事とする:

(i) $\Sigma_u \in \Gamma_{\mathbb{E}}^{\wedge}(m)$ (ただし, $\Sigma_u(x) \equiv \Sigma(x, u)$ for $\forall (x, u) \in (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^k, (0, 0))$) と定義する)

(ii) $\Sigma_0 = \nu$.

注意: 我々は上記 Σ を "unfolding" と呼んだが, これは "deformation" と呼んだ方がよいかもしれない. unfolding という意味からみると, パラメータが $E(M)$ のファイバーにも影響を及ぼす (i.e. Σ を $E(\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^k)$ の section-germs として定義する) 様にすべきなのかもしれない.

定義 1.4. $\Sigma: (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^k, (0, 0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0) \ni \nu \in \Gamma_{\mathbb{E}}^{\wedge}(m)^0$ の \wedge -unfolding とする. $f: (\mathbb{R}^k, 0) \rightarrow (\mathbb{R}^k, 0) \ni$ smooth map-germ とする時, $\Omega(x, v) := \Sigma(x, f(v))$ for $\forall (x, v) \in (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^k, (0, 0))$ で定義される map-germ

$$\Omega: (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^k, (0, 0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0) \quad (4)$$

は, \mathcal{N} の k -次元 Λ -unfolding である. これを $f^*\Sigma$ と書いて,
 Σ の f による induced Λ -unfolding と呼ぶ.

定義 1.5. $\Sigma, \Omega : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^k, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^n), 0)$ を $\mathcal{N} \in \Gamma_{E(\mathbb{R}^n)}^0$
 の k -次元 Λ -unfoldings とする. Σ と Ω が \mathcal{G}_E -equivalent とは
 , 次の条件を満足する事とする:

map-germ $(\tilde{h}, H) : (\mathbb{R}^k, 0) \rightarrow \mathcal{G}_E(\mathbb{R}^n)$ で

(i) $(\tilde{h}, H)(0) = 1$

(ii) $(\widehat{\tilde{h}, H}) : (\mathbb{R}^m \times E(\mathbb{R}^n) \times \mathbb{R}^k, (0,0,0)) \rightarrow (\mathbb{R}^m \times E(\mathbb{R}^n), (0,0))$

by $(\widehat{\tilde{h}, H})(x, y, u) \equiv (\tilde{h}(u(x), H(u)(y)))$

が smooth map-germ

を満足するものが存在して, 次の diagram を可換にする:

$$\begin{array}{ccc} (\mathbb{R}^m, 0) & \xrightarrow{\Sigma_u} & (E(\mathbb{R}^n), 0) \\ \tilde{h}(u) \downarrow & \curvearrowright & \downarrow H(u) \quad \text{for } \forall u \in (\mathbb{R}^k, 0). \\ (\mathbb{R}^m, 0) & \xrightarrow[\Omega_u]{} & (E(\mathbb{R}^n), 0) \end{array}$$

定義 1.6. $\Sigma : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^k, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^n), 0)$,

$\Omega : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^s, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^n), 0)$ をそれぞれ $\mathcal{N} \in \Gamma_{E(\mathbb{R}^n)}^0$ の

Λ -unfoldings とする. Ω から Σ への \mathcal{G}_E -morphism $\Phi : \Omega \rightarrow \Sigma$

とは, 3 対 $\Phi = ((\tilde{h}, H), f)$ であり, $(\tilde{h}, H) : (\mathbb{R}^s, 0) \rightarrow \mathcal{G}_E(\mathbb{R}^n)$ は

map-germ で定義 1.5 における (i) (ii) を満足するもの,

$f : (\mathbb{R}^s, 0) \rightarrow (\mathbb{R}^k, 0)$ は C^∞ -map-germ であって, $f^*\Sigma$ が

(5)

Ω と (h, H) によって \mathcal{G}_E -equivalent となる事とする.

この様にして, $\nu \in \Gamma_{\hat{E}(m)}^0$ の \mathcal{G}_E -equivalence に対応する Λ -unfoldings のカテゴリ-が構成されたが, このカテゴリ-における "versal object" とは以下の物である.

定義 1.7. $\Sigma : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^r, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ を $\nu \in \Gamma_{\hat{E}(m)}^0$ の Λ -unfolding とする. Σ が ν の versal Λ -unfolding relative to $\mathcal{G}_E(m)$ であるとは, 任意にあたえられた ν の Λ -unfolding Ω に対して, \mathcal{G}_E -morphism $\Phi : \Omega \rightarrow \Sigma$ が存在する事とする.

さて, versal Λ -unfoldings を特徴づけるための有力な候補として以下の様に formulate されるところの infinitesimally versal Λ -unfoldings という概念がある.

今, $\Theta(m)$ で \mathbb{R}^m 上の C^∞ -vector fields の 0 における germ 全体をあらわす. この時, 常微分方程式の解の存在定理により任意の $\xi \in \Theta(m)$ に対して, 一意的に $\varphi : (\mathbb{R}^m \times (-\varepsilon, \varepsilon), (0,0)) \rightarrow (\mathbb{R}^m, 0)$ という C^∞ -map-germ で $\varphi_t \in \mathcal{D}^m(m)$ かつ $\varphi_0 = 1$ をみたすものが存在して, $\frac{d\varphi_t}{dt} \Big|_{t=0} = \xi$ と書けることを注意しておく.

さて \mathcal{G}_E に対応する "die 環" $\Theta_{\hat{E}(m)}^{\mathcal{G}_E}$ を以下の様に定義する:

$$\Theta_{\hat{E}(m)}^{\mathcal{G}_E} \equiv \left\{ (\xi, \eta) \in \Theta(m) \times \Theta(E(m)) \mid \xi = \frac{dh_t}{dt} \Big|_{t=0}, \eta = \frac{dH_t}{dt} \Big|_{t=0} \right.$$

$$\left. \text{for } (h_t, H_t) \in \mathcal{G}_E(m) \ \& \ (h_0, H_0) = 1 \right\}.$$
 一般に $\Theta_{\hat{E}(m)}^{\mathcal{G}_E}$ は $\Theta(m) \times \Theta(E(m))$ の \mathbb{R} -linear subspace となる.

次に, $\nu \in \Gamma_{\hat{E}(m)}^0$ に対して

(6)

$$\widehat{T}_\nu : \theta(\mathbb{R}^m) \times \theta(E(\mathbb{R}^m)) \longrightarrow C_0^\infty(\mathbb{R}^m, E(\mathbb{R}^m))$$

を $\widehat{T}_\nu(\xi, \eta) := d\nu \circ \xi + \eta \circ \nu$ で定義する.

(ただし, $C_0^\infty(\mathbb{R}^m, E(\mathbb{R}^m))$ を \mathbb{R}^m から $E(\mathbb{R}^m)$ への原点における C^∞ -map-germs 全体とする). さうに $E(\mathbb{R}^m) \cong \mathbb{R}^m \oplus V(\mathbb{R}^m)$ をつか

って $C_0^\infty(\mathbb{R}^m, E(\mathbb{R}^m)) = C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m) \oplus C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ という分解を考

え, $\pi_V : C_0^\infty(\mathbb{R}^m, E(\mathbb{R}^m)) \longrightarrow C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ を canonical

projection とする. この時 $T_\nu \equiv \pi_V \circ \widehat{T}_\nu$ と表わす.

定義 1.8. $T_\nu^g \equiv T_\nu|_{\theta_E^g(\mathbb{R}^m)} : \theta_E^g(\mathbb{R}^m) \longrightarrow C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ を ν の infinitesimal map relative to $g_E(\mathbb{R}^m)$ と呼ぶ.

ここで

仮定(*). $\Gamma_E^\wedge(\mathbb{R}^m) \subset C_0^\infty(\mathbb{R}^m, E(\mathbb{R}^m))$ であるか, 今

$\pi_V(\Gamma_E^\wedge(\mathbb{R}^m))$ は $C_0^\infty(\mathbb{R}^m, E(\mathbb{R}^m))$ の \mathbb{R} -affine space (i.e. $\pi_V(\Gamma_E^\wedge(\mathbb{R}^m)) \ni \forall \nu, w$ に対して, $\{t\nu + (1-t)w \mid t \in \mathbb{R}\} \subset \pi_V(\Gamma_E^\wedge(\mathbb{R}^m))$) であると仮定する.

注意 今, 任意の $\nu \in \Gamma_E^\wedge(\mathbb{R}^m)$ について,

$$C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))_\nu := \{ \tau \in C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) \mid \tau = w - \pi_V(\nu) \text{ for } w \in \pi_V(\Gamma_E^\wedge(\mathbb{R}^m)) \}$$

とおくと, これは \mathbb{R} -linear subspace of $C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ となり, 次の性質をもつ.

1) 任意の $\nu, \nu' \in \Gamma_E^\wedge(\mathbb{R}^m)$ に対して, $C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))_\nu = C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))_{\nu'}$ (この事実より, $C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ と書く).

2) $f : (\mathbb{R}^m \times (-\varepsilon, \varepsilon), 0 \times (-\varepsilon, \varepsilon)) \longrightarrow V(\mathbb{R}^m)$ とし $\exists C^\infty$ -map-germ (τ)

で, $f_t \in \pi_V(\Gamma_E^\wedge(m))$ から $f_0 = \pi_V(\mathcal{N})$ を満足するものに対して $\frac{df_t}{dt}|_{t=0} \in C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ が成立する.

さて, $\Sigma : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ を $\mathcal{N} \in \Gamma_E^\wedge(m)^0$ の Λ -unfolding とする, この時, $\frac{\partial \Sigma}{\partial u_i} : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p, (0,0)) \rightarrow V(\mathbb{R}^m)$ により

いて, $\Sigma_u \in \Gamma_E^\wedge(m)$ & $\Sigma_0 = \mathcal{N}$ が成立しているので

$\frac{\partial \Sigma}{\partial u_i}|_{\mathbb{R}^m \times 0} \in C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ である. 従って, \mathbb{R} -linear space

$V_\Sigma \equiv \langle \frac{\partial \Sigma}{\partial u_1}|_{\mathbb{R}^m \times 0}, \dots, \frac{\partial \Sigma}{\partial u_p}|_{\mathbb{R}^m \times 0} \rangle_{\mathbb{R}}$ は $C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ の sub-space となる.

定義 1.9. $\Sigma : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ を $\mathcal{N} \in \Gamma_E^\wedge(m)^0$ の Λ -unfolding とする. Σ が infinitesimally versal Λ -unfolding relative to \mathcal{G}_E であるとは, 以下の式を満足する事である:

$$C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) \subset T_{\mathcal{N}}^{\mathcal{G}}(\theta_E^{\mathcal{G}}(m)) + V_\Sigma.$$

この時, 次の命題を得る.

命題 A $\dim_{\mathbb{R}} \frac{C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) + T_{\mathcal{N}}^{\mathcal{G}}(\theta_E^{\mathcal{G}}(m))}{T_{\mathcal{N}}^{\mathcal{G}}(\theta_E^{\mathcal{G}}(m))} < +\infty$ ならば $\mathcal{N} \in \Gamma_E^\wedge(m)$ に対して, Σ を \mathcal{N} の versal Λ -unfolding relative to \mathcal{G}_E とする時 それは \mathcal{N} の infinitesimally versal Λ -unfolding relative to \mathcal{G}_E である.

[証明] $T_{\mathcal{N}}^{\mathcal{G}}(\theta_E^{\mathcal{G}}(m))^\wedge \equiv T_{\mathcal{N}}^{\mathcal{G}}(\theta_E^{\mathcal{G}}(m)) \cap C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ とおくと
 $\dim_{\mathbb{R}} \frac{C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))}{T_{\mathcal{N}}^{\mathcal{G}}(\theta_E^{\mathcal{G}}(m))^\wedge} = \dim_{\mathbb{R}} \frac{C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) + T_{\mathcal{N}}^{\mathcal{G}}(\theta_E^{\mathcal{G}}(m))}{T_{\mathcal{N}}^{\mathcal{G}}(\theta_E^{\mathcal{G}}(m))} = s < +\infty$
 である. 従って, $C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ の元 b_1, \dots, b_s で, $\{b_1, \dots, b_s\}$ が $\frac{C_0^\wedge(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))}{T_{\mathcal{N}}^{\mathcal{G}}(\theta_E^{\mathcal{G}}(m))^\wedge}$ を \mathbb{R} 上生成するものが存在する.
 (8)

今, $\Omega : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^s, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ を

$$\Omega(x, v) \equiv (x, \pi_V(\omega)(x) + v_1 b_1(x) + \dots + v_s b_s(x)) \quad \text{for } (x, v) \in \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^s$$

で定義すると, これは infinitesimally versal Λ -unfolding of ω relative to \mathcal{G}_E となる. Σ が versal Λ -unfolding of ω relative to \mathcal{G}_E なので, \mathcal{G}_E -morphism $\Phi : \Omega \rightarrow \Sigma$ が存在する. 従って, \mathcal{G}_E -morphism の定義と直接的な計算により, Σ は, infinitesimally versal Λ -unfolding of ω relative to \mathcal{G}_E となる.

[証明終]

一般に, この命題の逆が成立する時 "versality theorem" が成立すると言う. 以下 "versality theorem" が成立するための条件を特徴づける事がこの小論の目的であるが, 以上の他に, \mathbb{R}^n の微分構造 (即ち \mathbb{R}^n 上の local \mathbb{R} -algebra) に関連した条件が必要になる. $C^\infty(\mathbb{R}^n) \equiv \{f \mid f: (\mathbb{R}^n, 0) \rightarrow \mathbb{R} : C^\infty\text{-function-germ}\}$

定義 1.10. 任意の自然数 m を固定する時, $R(m) \subset C^\infty(\mathbb{R}^m)$ が finite type の sub \mathbb{R} -algebra であるとは, 以下の条件を満足する事である:

(i) $R(m)$ は $C^\infty(\mathbb{R}^m)$ の sub \mathbb{R} -algebra である

(ii) 有限個の元 $P_1, \dots, P_k \in R(m)$ が存在して,

$$P \equiv (P_1, \dots, P_k) : (\mathbb{R}^m, 0) \rightarrow (\mathbb{R}^k, a) \quad \text{と} \quad \text{いう } C^\infty\text{-map-germ}$$

により, $P^* : C_a^\infty(\mathbb{R}^k) \rightarrow C^\infty(\mathbb{R}^m)$ by $P^*(R) \equiv R \circ P$ を考えるとき, $P^*(C_a^\infty(\mathbb{R}^k)) = R(m)$ が成立する.

(9)

さて, $\text{Aut}_E^\infty(M)$ を $E(M)$ の local smooth fibre bundle aut 全体のつくる pseudo group とすると, これは essential pseudo group の中で最大のものである. 今, $\text{Aut}_E^\infty(M)$ に対応する "環" を $\Theta_E^A(M)$ と書くと, これは自然に $C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ -module となる. また, $C_0^\infty(\mathbb{R}^n, V(\mathbb{R}^n))$ は自然に $C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ -module となる. 今, $R(M)$ は $C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ の sub \mathbb{R} -algebra なので, $\Theta_E^A(M)$ と $C_0^\infty(\mathbb{R}^n, V(\mathbb{R}^n))$ は自然に $R(M)$ -module となる.

定義 1.11. 3 対 $(\Gamma_E^A(M), \mathcal{G}_E(M), R(M))$ が essential であるとは, (i) $\Gamma_E^A(M)$ は仮定(*)をみたす section-germs の集合
(ii) $\mathcal{G}_E(M)$ は $\mathcal{D}(\mathbb{R}^n) \times \mathcal{D}(E(\mathbb{R}^n))$ の essential subpsendgroup
(iii) $R(M)$ は $C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ の finite type の sub \mathbb{R} -algebra
であり, 次の条件をみたすものである:

- (a) $\langle C_0^\infty(\mathbb{R}^n, V(\mathbb{R}^n)) \rangle_{R(M)}$ は finitely generated $R(M)$ -module であり, かつ $T_\nu^{\mathcal{G}}(\Theta_E^{\mathcal{G}}(M)) \subset \langle C_0^\infty(\mathbb{R}^n, V(\mathbb{R}^n)) \rangle_{R(M)}$ for $\forall \nu \in \Gamma_E^A(M)$
(b) $\Theta_E^{\mathcal{G}}(M)$ は $\Theta_E^A(M)$ の $R(M)$ -submodule
(c) $T_\nu^{\mathcal{G}} : \Theta_E^{\mathcal{G}}(M) \rightarrow \langle C_0^\infty(\mathbb{R}^n, V(\mathbb{R}^n)) \rangle_{R(M)}$ は $R(M)$ -homomorphism for $\forall \nu \in \Gamma_E^A(M)$.

この時, 我々の主要定理は以下のものである.

定理 B (Versality theorem) $(\Gamma_E^A(M), \mathcal{G}_E(M), R(M))$ を essential な 3 対として, $\dim_{\mathbb{R}} \frac{\langle C_0^\infty(\mathbb{R}^n, V(\mathbb{R}^n)) \rangle_{R(M)}}{C_0^\infty(\mathbb{R}^n, V(\mathbb{R}^n)) + T_\nu^{\mathcal{G}}(\Theta_E^{\mathcal{G}}(M))} < +\infty$ を満足する $\nu \in \Gamma_E^A(M)^\circ$ に対して, Σ を infinitesimally versal Λ -unfolding (10)

of \mathcal{N} relative to \mathcal{G}_E とするならば, それは versal Λ -unfolding of \mathcal{N} relative to \mathcal{G}_E である.

§2. 定理Bの証明の概略.

ここでは, 定理Bの証明に必要な補題をあげ, それにより定理Bを証明する. かくしくは, Izumiya [3] を参照.

定理Bを証明するためには, 次の補題が鍵である.

補題 2.1. 定理Bと同じ仮定の下で,

$\Sigma, \Omega : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ を $\mathcal{N} \in \Gamma_{\mathcal{G}_E}^{\wedge(m)}$ の上次元 Λ -unfolding relative to \mathcal{G}_E とする. もし, Σ, Ω ^が 両方とも infinitesimally versal Λ -unfolding relative to \mathcal{G}_E ならば, Σ と Ω は \mathcal{G}_E -isomorphic である.

この補題 2.1. を仮定すると定理Bはただちに証明する事ができる.

[定理Bの証明] $\Sigma : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ を $\mathcal{N} \in \Gamma_{\mathcal{G}_E}^{\wedge(m)}$ の infinitesimally versal Λ -unfolding relative to \mathcal{G}_E とする. 今, $\Omega : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^s, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ を \mathcal{N} の他の任意の Λ -unfolding とする. $\Omega_1^*(x, u, v) \equiv \pi_V(\Omega)(x, v) - \pi_V(\Omega)(x) + \pi_V(\Sigma)(x, u)$ for $\forall (x, u, v) \in (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^s, (0,0,0))$ とおくと, $\pi_V(\Gamma_{\mathcal{G}_E}^{\wedge(m)})$ が affine \mathbb{R} -space $\mathcal{T}_{\mathcal{G}_E}$ ので $\Omega^* : (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{p+s}, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ def by $\Omega^*(x, u, v) = (x, \Omega_1^*(x, u, v))$ は \mathcal{N} の Λ -unfolding となり, その偏微分 $\frac{\partial \Omega^*}{\partial u_i}$ は $\frac{\partial \Sigma}{\partial u_i}$ ($i=1, \dots, p$) に等しい. 従って,

(1)

$V_{\Sigma} \subset V_{\Omega^*}$ とはり, Σ が infinitesimally versal なるので, Ω^* も infinitesimally versal である. また, $\Sigma^*: (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{r+s}, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ を $\Sigma^*(x, u, v) \equiv \Sigma(x, u)$ と定義すると, 同様にして, Σ^* は infinitesimally versal Λ -unfolding of α relative to \mathcal{G}_E である.

(かも西オとも $(r+s)$ -次元であるから, 補題 2.1. より Σ^* と Ω^* は \mathcal{G}_E -isomorphic である. さらに Ω は Ω^* の canonical inclusion i による induced Λ -unfolding であり, かつ Σ^* は Σ の canonical projection π による induced Λ -unfolding であるので, Ω から Σ への \mathcal{G}_E -morphism が存在する. [証明終]

従って, 補題 2.1. を証明すればよいのであるが. その為に必要な 2~3 の補題を述べる (証明は省略する).

定義 2.2. $\Sigma, \Omega: (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^r, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^m), 0)$ を $\alpha \in \mathcal{P}_E(m)^0$ の infinitesimally versal Λ -unfoldings relative to \mathcal{G}_E とする.

Σ と Ω が linear versally homotopic relative to \mathcal{G}_E とは,

$$\Sigma_t(x, u) \equiv (x, t\pi_V(\Omega)(x, u) + (1-t)\pi_V(\Sigma)(x, u))$$

とおいた時, 任意の $t \in [0, 1]$ について, Σ_t が infinitesimally versal Λ -unfolding relative to \mathcal{G}_E である時に言う.

補題 2.3. linear versally homotopic な Λ -unfoldings に対して, 補題 2.1. の主張を示せば, 任意の Λ -unfoldings に対して, 補題 2.1. の主張が成立する.

次に, 常微分方程式にかんする 1 つの補題を必要とする.
(12)

$\Sigma, \Omega : (\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r, (0,0)) \rightarrow (E(\mathbb{R}^n), 0) \ni \mathcal{N} \in \Gamma_{E(m)}^{\wedge 0}$ の \wedge -unfolding とする. さきには $b_1, \dots, b_s \in C_0^{\wedge}(\mathbb{R}^n, V(\mathbb{R}^n))$ と fixed する. このとき

$$\tilde{\Phi}(x, u, v, t) \equiv (x, t\pi_V(\Omega)(x, u) + (1-t)\pi_V(\Sigma)(x, u) + \sum_{j=1}^s u_j b_j(x))$$

for $(x, u, v, t) \in (\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r \times \mathbb{R}^s \times \mathbb{R}, 0)$

とおくと, $\tilde{\Phi}$ は \mathcal{N} の \wedge -unfolding である. 次に

$$\Psi : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r \times \mathbb{R}^s \times \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}^n \times V(\mathbb{R}^n) \times \mathbb{R}^r \times \mathbb{R}^s \times \mathbb{R}$$

$$\text{を } \Psi(x, u, v, t) \equiv (\tilde{\Phi}(x, u, v, t), u, v, t)$$

により定義する.

$\Theta(n+r+s+1)$ の元 $X = \sum_{i=1}^n \xi_i(x, u, v, t) \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^r \eta_j(x, u, v, t) \frac{\partial}{\partial u_j} + \sum_{\ell=1}^s \tau_{\ell}(x, u, v, t) \frac{\partial}{\partial v_{\ell}} + \xi(x, u, v, t) \frac{\partial}{\partial t}$ に対して.

$$\Psi'(X) \equiv \sum_{i=1}^n \xi_i(x, u, v, t) \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^g \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial \Phi_k}{\partial x_i} \xi_i + \sum_{j=1}^r \frac{\partial \Phi_k}{\partial u_j} \eta_j + \sum_{\ell=1}^s \tau_{\ell} \cdot b_{\ell}^k + \xi \cdot \frac{\partial \Phi_k}{\partial t} \right) \frac{\partial}{\partial y_k} + \sum_{i=1}^r \eta_i \frac{\partial}{\partial u_i} + \sum_{\ell=1}^s \tau_{\ell} \frac{\partial}{\partial v_{\ell}} + \xi \frac{\partial}{\partial t}$$

(ただし, $\Phi(x, u, t) \equiv (x, t\pi_V(\Omega)(x, u) + (1-t)\pi_V(\Sigma)(x, u))$ とお

く) と定義し, さきには $\Theta(E(m)+r+s+1)$ の元 $Y = \sum_{i=1}^n \xi_i(x, y, u, v, t) \frac{\partial}{\partial x_i}$

$$+ \sum_{k=1}^g \lambda_k(x, y, u, v, t) \frac{\partial}{\partial y_k} + \sum_{j=1}^r \eta_j(x, y, u, v, t) \frac{\partial}{\partial u_j} + \sum_{\ell=1}^s \tau_{\ell}(x, y, u, v, t) \frac{\partial}{\partial v_{\ell}}$$

$$+ \xi(x, y, u, v, t) \frac{\partial}{\partial t} \quad (\text{ただし, } \dim V(\mathbb{R}^n) = g \text{ としてその原点のま$$

わりのある coordinate を (y_1, \dots, y_g) とする) に対して,

$$(Y \circ \Psi)' \equiv \sum_{i=1}^n \xi_i(x, y, u, v, t) \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^g (\lambda_k(\Phi(x, u, t), u, v, t) + \sum_{\ell=1}^s \tau_{\ell} b_{\ell}^k) \frac{\partial}{\partial y_k}$$

$$+ \sum_{i=1}^r \eta_i \frac{\partial}{\partial u_i} + \sum_{\ell=1}^s \tau_{\ell} \frac{\partial}{\partial v_{\ell}} + \xi \frac{\partial}{\partial t} \text{ と定義する.}$$

この時, 次の補題を得る.

(13)

補題 2.4. $\Theta(m+r+s+t)$ の元 X と $\Theta(m+q+r+s+t)$ の元 Y で、
次の条件を満足するものが存在すると仮定する。

- 1) $\Psi'(X) = (Y \cdot \Psi)'$
- 2) $X = \sum_{i=1}^m \xi_i(x, u, t) \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^r \eta_j(u, t) \frac{\partial}{\partial u_j} + \sum_{\ell=1}^s t_\ell(u, t) \frac{\partial}{\partial v_\ell} + \frac{\partial}{\partial t}$ とかける。
(ただし, $\xi_i \in \mathcal{M}_R C_0^\infty(\mathbb{R}^{m+r+t})$, $\eta_j, t_\ell \in \mathcal{M}_R C_0^\infty(\mathbb{R}^{m+q+t})$.)
- 3) $Y = \sum_{i=1}^m \xi_i(x, u, t) \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^q \lambda_k(x, y, u, t) \frac{\partial}{\partial y_k} + \sum_{j=1}^r \eta_j(u, t) \frac{\partial}{\partial u_j} + \sum_{\ell=1}^s t_\ell(u, t) \frac{\partial}{\partial v_\ell} + \frac{\partial}{\partial t}$ とかける。
(ただし, $\lambda_k \in \mathcal{M}_R C_0^\infty(\mathbb{R}^{m+q+r+t})$.)
- 4) $X'(u, t) \equiv \sum_{i=1}^m \xi_i(x, u, t) \frac{\partial}{\partial x_i}$, $Y'(u, t) \equiv \sum_{k=1}^q \lambda_k(x, y, u, t) \frac{\partial}{\partial y_k}$ とおくと、
 $(X'(u, t), X'(u, t) \oplus Y'(u, t)) \in \theta_{\mathbb{R}}^{\mathbb{R}^r}(m)$ for $\forall (u, t) \in (\mathbb{R}^r \times \mathbb{R}, 0)$.
この時、 $\Phi_0 = \Sigma$ と Φ_τ は十分小さい $\tau > 0$ に対して、 \mathbb{R}_F -isomorphic である。

さらに、local \mathbb{R} -algebra $R(m)$ の性質について言及する必要がある。今、任意の $r \in \mathbb{N}$ について、

$$C_{R(m)}^\infty(\mathbb{R}^{m+r}) \equiv \{ f \in C_0^\infty(\mathbb{R}^{m+r}) \mid f_u \in R(m) \text{ for } \forall u \in (\mathbb{R}^r, 0) \}$$

とおくと、これは $C_0^\infty(\mathbb{R}^{m+r})$ の sub \mathbb{R} -algebra となる。

$\pi : (\mathbb{R}^{m+r}, 0) \rightarrow (\mathbb{R}^r, 0)$ を projection とすると、ring homo

$\pi^* : C_0^\infty(\mathbb{R}^r) \rightarrow C_{R(m)}^\infty(\mathbb{R}^{m+r})$ が well-defined である。

補題 2.5. $\pi^* : C_0^\infty(\mathbb{R}^r) \rightarrow C_{R(m)}^\infty(\mathbb{R}^{m+r})$ は Weierstraß 性を
持つ。(i.e. A : finitely generated $C_{R(m)}^\infty(\mathbb{R}^{m+r})$ -module で、
 $\geq \dim_{\mathbb{R}} A / \pi^*(\mathcal{M}_{\mathbb{R}^r})A < +\infty$ とすると、 A は finitely generated $C_0^\infty(\mathbb{R}^r)$ -module via π^* である.)
(14).

Nakayamaの補題を使うと、この補題の系として以下のものが従う。

系 M を finitely generated $C_{R(m)}^\infty(\mathbb{R}^{m+l})$ -module, N を M の $C_{R(m)}^\infty(\mathbb{R}^{m+l})$ -submodule, A を M の finitely generated $C_0^\infty(\mathbb{R}^l)$ -submodule via π^* とする. もし $M = N + A + \pi^*(M_{\mathbb{R}})M$ が成立すると $\overset{\text{た}}$ $M = N + A$ である.

さて、定理Bの仮定から、 $b_1, \dots, b_s \in \langle C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) \rangle_{R(m)}$ という有限個の元で、 $\{b_1, \dots, b_s\}$ が $\frac{\langle C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) \rangle_{R(m)}}{T_{\mathbb{R}}^0(\theta_{\mathbb{R}}^m) + C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))}$ を \mathbb{R} 上生成するものがある。

次に、

$$\widetilde{C_0^\infty(\mathbb{R}^{m+l+1}, V)} \equiv \{R \in C_0^\infty(\mathbb{R}^{m+l+1}, V) \mid R|_{\mathbb{R}^m \times \{u, t\}} \in \langle C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V) \rangle_{R(m)}, \text{ for } \forall (u, t) \in (\mathbb{R}^m, 0)\}$$

とおくと、これは $\langle C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V) \rangle_{R(m)}$ が finitely generated $R(m)$ -module になるので、finitely generated $C_{R(m)}^\infty(\mathbb{R}^{m+l+1})$ -module となる。

また、

$$\widetilde{\theta^{(m+l+1)}} \times \widetilde{\theta^{(E(m)+l+1)}} \equiv \{(X, Y) \mid X: (\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1})_{(0,0)} \rightarrow T\mathbb{R}^m,$$

$$Y: (E(\mathbb{R}^m) \times \mathbb{R}^{l+1})_{(0,0)} \rightarrow TE(\mathbb{R}^m) : C^\infty\text{-map-germs s.t.}$$

$$(X_{(u,t)}, Y_{(u,t)}) \in \theta^{(m)} \times \theta^{(E(m))} \text{ for } \forall (u,t) \in (\mathbb{R}^{l+1}, 0)\}$$

(ここで $E(\mathbb{R}^m) \cong \mathbb{R}^m \times V(\mathbb{R}^m)$ の coordinates を (x, y) とおくと、

$$X = \sum_{i=1}^m \xi_i(x, u, t) \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad Y = \sum_{i=1}^m \zeta_i(x, y, u, t) \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^r \eta_j(x, y, u, t) \frac{\partial}{\partial y_j}$$

とかける)。この時、 $\widetilde{\theta^{(m+l+1)}} \times \widetilde{\theta^{(E(m)+l+1)}}$ は自然に $C_0^\infty(\mathbb{R}^{m+l+1})$ -module となる。

さすに, $\widetilde{\Theta}_{\mathbb{E}}^{\mathcal{G}}(m+l+1) \equiv \{ (X, Y) \in \widetilde{\Theta}(m+l+1) \times \widetilde{\Theta}(E(m)+l+1) \mid (X(u, t), Y(u, t)) \in \Theta_{\mathbb{E}}^{\mathcal{G}}(m) \text{ for } \forall (u, t) \in (\mathbb{R}^{m+l}, 0) \}$ とおくと, これは $C_{\mathbb{R}(m)}^{\infty}(\mathbb{R}^{m+l+1})$ -module とする ($\Theta_{\mathbb{E}}^{\mathcal{G}}(m)$ が $\mathbb{R}(m)$ -module なの
で).

次に, これらの module の間の homomorphism を次の様に構成する:
 $d_x \Phi : T\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1} \rightarrow TE(\mathbb{R}^m)$ defined by
 $d_x \Phi(\alpha \circ v, (u, t)) := d(\Phi(u, t))_{x_0}(v)$ に対して, 以下の図式を

$$\begin{array}{ccc} T\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1} & \xrightarrow{d_x \Phi} & TE(\mathbb{R}^m) \\ \uparrow (X, id_{\mathbb{R}^{l+1}}) & \nearrow d_x \Phi \circ (X, id_{\mathbb{R}^{l+1}}) & \uparrow Y \\ \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1} & \xrightarrow{(\Phi, id_{\mathbb{R}^{l+1}})} & E(\mathbb{R}^m) \times \mathbb{R}^{l+1} \end{array} \quad \text{for } \forall (X, Y) \in \widetilde{\Theta}(m+l+1) \times \widetilde{\Theta}(E(m)+l+1)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{\pi}_V &: C_0^{\infty}(\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1}, TE(\mathbb{R}^m)) = C_0^{\infty}(\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1}, E(\mathbb{R}^m) \times E(\mathbb{R}^m)) \\ &= C_0^{\infty}(\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1}, E(\mathbb{R}^m) \times \mathbb{R}^m \times V(\mathbb{R}^m)) \longrightarrow C_0^{\infty}(\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1}, V(\mathbb{R}^m)) \end{aligned}$$

を canonical projection として

$$T_{\Phi} : \widetilde{\Theta}(m+l+1) \times \widetilde{\Theta}(E(m)+l+1) \longrightarrow C_0^{\infty}(\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1}, V(\mathbb{R}^m))$$

を $T_{\Phi}(X, Y) \equiv \widetilde{\pi}_V(d_x \Phi \circ (X, id_{\mathbb{R}^{l+1}}) + Y \circ (\Phi, id_{\mathbb{R}^{l+1}}))$ により定義する. この時

$$T_{\Phi}^{\mathcal{G}} \equiv T_{\Phi} |_{\widetilde{\Theta}_{\mathbb{E}}^{\mathcal{G}}(m+l+1)} : \widetilde{\Theta}_{\mathbb{E}}^{\mathcal{G}}(m+l+1) \longrightarrow C_0^{\infty}(\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1}, V(\mathbb{R}^m))$$

とおくと, これは各 $T_{\Phi(u, t)}^{\mathcal{G}} : \Theta_{\mathbb{E}}^{\mathcal{G}}(m) \rightarrow \langle C_0^{\infty}(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) \rangle_{\mathbb{R}(m)}$ かつ, $\mathbb{R}(m)$ -homo なのぞ, $\widetilde{\Theta}_{\mathbb{E}}^{\mathcal{G}}(m+l+1)$ が $\widehat{C}_0^{\infty}(\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{l+1}, V(\mathbb{R}^m)) \wedge$ の $C_{\mathbb{R}(m)}^{\infty}(\mathbb{R}^{m+l+1})$ -homo とする.

補題 2.5. を使, て次の補題を得る.

補題 2.6. $\mathcal{M}_{\mathbb{R}} \widetilde{C}_0^\wedge(\mathbb{R}^{m+l+1}, V(\mathbb{R}^m)) = \mathcal{M}_{\mathbb{R}} T_{\Phi}^{\mathcal{G}}(\widetilde{\Theta}_{\mathbb{E}}^{\mathcal{G}}(m+l+1))$
 $+ \langle \frac{\partial \Phi}{\partial u_1}, \dots, \frac{\partial \Phi}{\partial u_r}, b_1, \dots, b_s \rangle_{\mathcal{M}_{\mathbb{R}} C_0^\infty(\mathbb{R}^{l+1})}.$

[補題 2.1. の証明]. $\Phi(x, 0, t) = \nu(x) \tau_t$ ので, $\frac{\partial \Phi}{\partial t}(x, 0, t) = 0.$

従, て, $\frac{\partial \Phi}{\partial t} \in \mathcal{M}_{\mathbb{R}} \widetilde{C}_0^\wedge(\mathbb{R}^{m+l+1}, V(\mathbb{R}^m))$, 故に, 補題 2.6 から,

$(X_\ell, Y_\ell) \in \widetilde{\Theta}_{\mathbb{E}}^{\mathcal{G}}(m+l+1)$, $\xi_\ell \in \mathcal{M}_{\mathbb{R}}$ ($\ell=1, \dots, p$) と, $\gamma_j(u, t)$,
 $\xi_k(u, t) \in \mathcal{M}_{\mathbb{R}} C_0^\infty(\mathbb{R}^{l+1})$ が存在して,

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t}(x, u, t) = \sum_{\ell=1}^p \xi_\ell T_{\Phi}^{\mathcal{G}}(X_\ell, Y_\ell) + \sum_{j=1}^r \gamma_j(u, t) \frac{\partial \Phi}{\partial u_j} + \sum_{k=1}^s \xi_k(u, t) b_k(x)$$

をみたす. 今, ここで, $\sum_{\ell} \xi_\ell T_{\Phi}^{\mathcal{G}}(X_\ell, Y_\ell) = T_{\Phi}^{\mathcal{G}}(\sum_{\ell} \xi_\ell X_\ell, \sum_{\ell} \xi_\ell Y_\ell)$

かゝ $(X_\ell, Y_\ell) \in \widetilde{\Theta}_{\mathbb{E}}^{\mathcal{G}}(m+l+1) \subset \Theta(m+l+1) \times \Theta(E(m)+l+1)$ τ_t ので,

$$X_\ell = \sum_{i=1}^m \kappa_i^\ell(x, u, t) \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad Y_\ell = \sum_{i=1}^m \kappa_i^\ell(x, u, t) \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{s=1}^s \tau_s^\ell(x, y, u, t) \frac{\partial}{\partial y_s}$$

とかける. あらためて, $\sum_{\ell=1}^p \xi_\ell \kappa_i^\ell(x, u, t) = \xi_i(x, u, t)$,

$$\sum_{\ell=1}^p \xi_\ell \tau_s^\ell = \lambda_s(x, y, u, t) \text{ とおくと } \xi_i \in \mathcal{M}_{\mathbb{R}} C_0^\infty(\mathbb{R}^{m+l+1})$$

かゝ $\lambda_s \in \mathcal{M}_{\mathbb{R}} C_0^\infty(\mathbb{R}^{m+s+l+1})$ である.

$$\text{ここで, } X \equiv \sum_{i=1}^m (-\xi_i(x, u, t)) \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^r (-\gamma_j(u, t)) \frac{\partial}{\partial u_j} + \sum_{\ell=1}^p (\xi_\ell) \frac{\partial}{\partial v_\ell}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial t}, \quad Y \equiv \sum_{i=1}^m (-\xi_i(x, u, t)) \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^s \lambda_k(x, y, u, t) \frac{\partial}{\partial y_k} +$$

$$\sum_{j=1}^r (-\gamma_j(u, t)) \frac{\partial}{\partial u_j} + \sum_{\ell=1}^s (-\xi_\ell) \frac{\partial}{\partial v_\ell} + \frac{\partial}{\partial t} \text{ とおくと, 二れらほ}$$

あきらかに補題 2.4. の条件をみたすハクトル場芽である.

[証明終].

§3 応用

最初に, 命題 A は 1) かなる vector bundle の 1) かなる smooth section-gamms の unfolding π に対しても成立することをことわっておく. 従って, 定理 B が成立する場合, 即ち essential triple とはどの様な例を名づかが問題となる.

A) $R(m) = C^{\infty}(\mathbb{R}^m)$ の時.

$$A-1) E(M) = M \times \mathbb{R}^p$$

① $\mathcal{G}_E(M) \equiv R(M) \equiv \{ (R, R \times L) \mid R: M \text{ 上の local diffeo. } L: \mathbb{R}^p \text{ 上の平行移動} \}$, $\Gamma_E^{\infty}(m) = \Gamma_E^{\infty}(m) = C^{\infty}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$ によって,

$(C^{\infty}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p), R(m), C^{\infty}(\mathbb{R}^m))$ は あきらかに essential.

$C^{\infty}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p) \ni f$ に対して, $T_f^R = df: \theta(m) \rightarrow C^{\infty}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$ で $df(\theta(m)) = \langle \frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_m} \rangle_{C^{\infty}(\mathbb{R}^m)}$, $C \cdot C^{\infty}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$: submodule. 今, 定理 B の仮定は あきらかに満足するので, 以下の定理が従う.

定理 3.1. (Thom-Mather-Zakalyukin [5], [9]) \bar{F} を $f \in C^{\infty}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$ の unfolding とする. この時.

$$C^{\infty}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p) = \langle \frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_m} \rangle_{C^{\infty}(\mathbb{R}^m)} + V_{\bar{F}} \text{ をみたすならば,}$$

\bar{F} は versal unfolding relative to R である.

(特に $p=1$ のときか Thom-Mather の初等カタストロフィの話である).

② $\mathcal{G}_E(M) = \text{Aut}_E^V(M) := \{ (R, H) \mid H \text{ は } M \times \mathbb{R}^p \text{ の local vector bundle aut で } R \text{ を cover する} \}$, $\Gamma_E^{\infty}(m) = \Gamma_E^{\infty}(m) = C^{\infty}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$ (18)

実はこの時、 $C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$ の元のあるべきの \mathcal{G}_E -equivalence は Mather の意味での \mathcal{K} -equivalence (Mather [6] 参照) であることがわかる。この意味で $\mathcal{G}_E(m) = \mathcal{K}(m, p)$ と書く。

$(C_0^\infty(m, p), \mathcal{K}(m, p), C_0^\infty(\mathbb{R}^m))$ はおきろかに essential であり、簡単な計算により、 $T_f^{\mathcal{K}}(\theta_E^{\mathcal{K}}(m)) = \tau f(\theta(m)) + f^*(m_p) C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p) = \langle \frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_m} \rangle_{C_0^\infty(\mathbb{R}^m)} + f^*(m_p) C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$ となることもわかる。この時、以下の定理が定理 B の例として従う。

定理 3.2. (Martinet [4], Golubitsky-Schaeffer [2]). F を $f \in C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$ の unfolding とする。この時

$C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p) = \langle \frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_m} \rangle_{C_0^\infty(\mathbb{R}^m)} + f^*(m_p) C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p) + V_F$ をみたすならば、 F は versal unfolding relative to $\mathcal{K}(m, p)$ である。

$$A-2) \quad E(\mathbb{R}^m) = \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^m$$

$$\mathcal{G}_E(\mathbb{R}^m) = \{ (h, h \times h) \mid h : \mathbb{R}^m \text{ 上の local diffeo } \}, \quad \Gamma_E^{\mathcal{K}}(m) = C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m).$$

この時、 $C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m)^0 \ni f, g$ が \mathcal{G}_E -equivalent とは、次の図式が可換なことである：

$$\begin{array}{ccc} (\mathbb{R}^m, 0) & \xrightarrow{f} & (\mathbb{R}^m, 0) \\ h \downarrow & \square & \downarrow h & \text{for } h : \text{invertible germ.} \\ (\mathbb{R}^m, 0) & \xrightarrow{g} & (\mathbb{R}^m, 0) \end{array}$$

これについて、 $\theta_E^{\mathcal{K}}(m) = \theta(m)$ とおき、定義 1.11.1 における条件 (b) は満足しているが、(c) の条件、 $T_f^{\mathcal{K}} : \theta(m) \rightarrow C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m)$ が $C_0^\infty(\mathbb{R}^m)$ -homo とする条件は満足しないので、 $(C_0^\infty(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m),$
(19)

$\mathcal{G}_E(M, C^\infty(\mathbb{R}^n))$ は essential ではない。事実、この場合には、
 "versality theorem" が成立しない例が知られている。([1])。

$$A-3) \quad E(M) = T(M)$$

この時: $\Gamma_T^\infty(M)$ はバクトル場の原点における芽である。
 この場合 $\mathcal{G}_T(M) \equiv \{(\varphi, d\varphi) \mid \varphi: M \text{ 上の local diffeo}\}$ とする
 と, $\Gamma_T^\infty(M)$ における \mathcal{G}_T -equivalence とは, バクトル場の C^∞ 座標
 変換による同値関係をあらわす。また, $\theta_T^\infty(M) \equiv \theta(M)$ であり
 infinitesimal map $T_X^\mathcal{G}: \theta(M) \rightarrow C^\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$ は Lie derivative
 $T_X^\mathcal{G}(Y) = L_Y X$ によりあたえられるので (計算によりわかる)
 これは $C^\infty(\mathbb{R}^n)$ -fomo ではない。従って, $(\Gamma_T^\infty(M), \mathcal{G}_T(M), C^\infty(\mathbb{R}^n))$
 は essential ではない。事実、この場合には "versality theorem" は
 成立しない事が知られている ([1])。

$$A-4) \quad E(M) = \bigwedge_P T^*(M)$$

この時, differentiable p-forms の芽について考えている事
 になるが, この場合も, 座標変換による同値関係を考えると,
 バクトル場と同様に Lie derivative が $C^\infty(\mathbb{R}^n)$ -fomo ではないとい
 う理由により, essential ではない。しかし, この場合は, ま
 た "versality theorem" が成立しない例はみつかっていない。(お
 そらくあるであろうと予想される)。

$$A-5) \quad E(M) = \bigoplus_P T^*(M)$$

この場合 $\Gamma_E^\infty(M)$ の元は local Pfaffian system を表わしている。
 (20)

$w = (w_1, \dots, w_p)$ を Pfaffian system の原点における germ とする時, w の特異点 x とは, $w_i(x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(x) dx_j$ と表示した時, 行列 $(a_{ij}(x))_{\substack{1 \leq i \leq p \\ 1 \leq j \leq n}}$ が退化する点の事である. これについて, 一番自然な同値関係は, もちろん座標変換によるものであるがこれは P-forms の場合と同じ理由により essential とはならない. (しかし, 今, w の特異点の分岐のみに注目する場合, 行列 $(a_{ij}(x))$ の rank を不変にする様な equivalence の中で良い性質をもっているもの (ie なるべく細かい) 同値関係で (しかも代数的条件で決まるもの ie map の場合の \mathcal{K} -同値の様なもの) で十分であろう. たとえば,

$\mathcal{G}_{\text{TM}}(M) = \{ (\pi^{-1} \oplus H^*) \mid H: TM \rightarrow TM: \text{vector bundle aut s.t. } H \text{ は } \pi \text{ を cover する} \}$ がその一つの候補となるであろう. これらの同値関係と座標変換の関係は今後の研究におうところか大きい.

A-5) 一般に, $E(M)$ を vector bundle とする時,

$D: \Gamma_E^\infty(M) \rightarrow \Gamma_E^\infty(M)$ を linear partially differential operator とする. $\Gamma_E^\infty(M) \rightarrow \mathcal{M}$ について, $D^{-1}(0) \cong \Gamma_E^D(M)_0$ とおくと, $C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) = \pi_V(D^{-1}(0))$ となる. 従って, $C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ は $e_i: \mathbb{R}^m \rightarrow V(\mathbb{R}^m)$ $e_i(x) = (0, \dots, 0, \overset{i}{1}, 0, \dots, 0)$ ($i=1, \dots, \dim V(\mathbb{R}^m)$) を含む. 故に, $\langle C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) \rangle_{C_0^\infty(\mathbb{R}^m)} = C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))$ となり, 定義 1.11. の (a) は常に満足する. (21).

従って、定義 1.11 における (b) (c) の条件を満足するような同値関係 $\theta_E(m)$ ($A-1$) におけるもの等) に対しては次の定理が成立する

定理 3.3. $\dim_{\mathbb{R}} \frac{C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m))}{C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) + T_{\theta_E(m)}^{\Delta}(\theta_E(m))} < +\infty$ を満足する $\nu \in \Gamma_E^D(m)$ に対して、 ν の D -unfolding Σ が $C_0^\infty(\mathbb{R}^m, V(\mathbb{R}^m)) \subset T_{\theta_E(m)}^{\Delta}(\theta_E(m)) + V_{\Sigma}$ を満足するならば、 Σ は versal D -unfolding relative to θ_E である。

もっと具体的に、 $E(M) = M \times \mathbb{R}$, D としてラプラス Δ をとると $T_E^D(m)g$ はポアソンの方程式 $\Delta u = g$ を満足するような $u \in C_0^\infty(\mathbb{R}^m)$ 全体の事である。この時 $C_0^\Delta(\mathbb{R}^m) = \Pi_V(\Delta^{-1}(0))$ は調和関数全体となり、以下の定理を得る

定理 3.4. $\dim_{\mathbb{R}} C_0^\infty(\mathbb{R}^m) / \langle \frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_m} \rangle_{C_0^\infty(\mathbb{R}^m)} < +\infty$ を満足する $f \in \Gamma_E^\Delta(m)g$ に対して、 f の Δ -unfolding F が $C_0^\Delta(\mathbb{R}^m) \subset \langle \frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_m} \rangle_{C_0^\infty(\mathbb{R}^m)} + V_F$ を満足するならば、 F は versal Δ -unfolding relative to \mathbb{R} である。

特に $\Gamma_E^D(m)_0 = C_0^\Delta(\mathbb{R}^m)$ (i.e. 調和関数) の場合、調和関数をポテンシヤルとして多様な現象の定性的研究に、この定理は応用できるものと思われる。

B) $R(m) = C_G^\infty(\mathbb{R}^m) = \{f \mid f: (\mathbb{R}^m, 0) \rightarrow \mathbb{R} : G\text{-invariant } C_0^\infty\text{-function germ}\}$ (G は compact Lie group で \mathbb{R}^m 上に linear に act) の時。

B-1) $E(M) = M \times \mathbb{R}^p$ (M は G -manifold).

① $\mathcal{G}_E(M) \equiv \mathcal{R}_G(M) = \{ (h, h \times L) \mid h: M \text{ 上の local equivariant diffeo} \\ L: \mathbb{R}^p \text{ 上の 平行移動} \}$. M とし て linear G -action の λ った

\mathbb{R}^n をつかう. $\Gamma_E^G(M) = \{ \nu \in \Gamma_E^{\text{loc}}(M) \mid \nu \text{ は equivariant} \}$ とおく

と, 実は. $\Gamma_E^G(M) = C_0^G(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p) = \{ f \in C_0^{\text{loc}}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p) \mid f(gx) = fa \text{ for } g \in G \}$

である. さらに, Schwartz [8] により, $C_0^G(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p)$ は有限生成

$C_0^G(\mathbb{R}^n)$ -module であることが知られている. また, $f \in$

$C_0^G(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p)$ に \mathbb{R}^p を $T_f^{\mathbb{R}^p} = df: \Theta_G(M) \rightarrow C_0^G(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p)$ (ただし,

$\Theta_G(M) \equiv \{ \xi \in \Theta(M) \mid \xi(gx) = Tg \cdot \xi(x) \text{ for } g \in G, x \in (\mathbb{R}^n, 0) \}$ とする)

とあり, これは $C_0^G(\mathbb{R}^n)$ -homo である. 従って, $(C_0^G(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p)$

$\mathcal{R}_G(M), C_0^G(\mathbb{R}^n)$) は essential triple である. この場合, \mathcal{R}_G -

equivalence とは invariant maps のあいだの G -right-equivalence

であり, $J_G(f) \equiv df(\Theta_G(M))$ とおくと次の定理が得られる.

定理 3.5. (Poénaru [7]) \bar{F} を $f \in C_0^G(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p)$ の G -unfolding

とする, この時

$C_0^G(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p) = J_G(f) + \mathcal{V}\bar{F}$ をみたすならば, \bar{F} は versal

G -unfolding relative to \mathcal{R}_G である.

② $\mathcal{G}_E(M) = \text{Aut}_G^V(M) := \{ (h, H) \mid H \text{ は } M \times \mathbb{R}^p \text{ の local}$

G -vectorbundle aut で \mathbb{R}^p を cover する $\}$ (ただし G は \mathbb{R}^p 上の表

現をもつとする). ①と同様に M とし て, linear G -action の

λ った \mathbb{R}^n を使う. この時 $\Gamma_E^G(M) = C_0^G(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p) \equiv \{ f \in C_0^{\text{loc}}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^p) \mid$

(23)

$f(gx) = g \cdot f(x)$ for $\forall x \in (\mathbb{R}^n, 0), g \in G$ とするとき, $C_G^q(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$ における G_E -equivalence とは equivariant map-germs のあいだの G -contact equivalence であり, この意味で $G_E(m) = \mathcal{K}_G(m, p)$ とかく. $(C_G^q(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p), \mathcal{K}_G(m, p), C_G^q(\mathbb{R}^m))$ は essential triple となり次の定理が従う.

定理 3.6. $F \in f \in C_G^q(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p)$ の G -unfolding とする, 三の時

$C_G^q(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p) = J_G(f) + f^*(m_2) C_G^q(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p) \cap (C_G^q(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^p) + V_F)$ をみたすならば, F は versal G -unfolding relative to \mathcal{K}_G である.

C) $R(m) = \mathbb{R}$

いかなる vector 束においてても, その section-germs の空間の jet (有限) をとってやると, affine subspace になれはるゝて, essential triple となり, 上記の example はるゝて "versality theorem" が成立する様になる.

文 献

- [1] Belitskii, G. R. : Equivalence and normal forms of germs of smooth mappings, Russian Math. Surveys 33, 107-177 (1978).
- [2] Golubitsky, M., Schaeffer, D. : A theory for imperfect bifurcation via singularity theory, Commun. Pure Appl. Math. 32, 21-98 (1979).