

第 2 章

Chern-Simons 理論の導入

この章は [?, Chapter4, 5] に相当する.

2.1 Charge-Flux composite

2.1.1 Aharonov-Bohm 効果

空間を表す多様体を Σ と書く. 電荷 q を持つ 1 つの粒子からなる系を考えよう. この系に静磁場をかけたとき, 粒子の古典的作用は自由粒子の項 S_0 と, 粒子と場の結合を表す項とに分かれる:

$$S[l] = S_0[l] + q \int_{t_i}^{t_f} dt \dot{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{A} = S_0[l] + q \int_l d\mathbf{x} \cdot \mathbf{A}$$

ただし $l: [t_i, t_f] \rightarrow \Sigma$ は粒子の軌跡を表す.

ここで, いつもの 2 重スリットを導入する. 粒子が $\mathbf{x}_i = \mathbf{x}(t_i)$ から出発して $\mathbf{x}_f = \mathbf{x}(t_f)$ に到達するとき, これらの 2 点を結ぶ経路全体の集合 $\mathcal{C}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_t)$ のホモトピー類は, スリット 1, 2 を通る経路それぞれでちょうど 2 つある. i.e. プロパゲーターは経路積分によって

$$\sum_{l \in \mathcal{C}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_t) \text{ s.t. slit 1}} e^{iS_0[l]/\hbar + i(q/\hbar) \int_l d\mathbf{x} \cdot \mathbf{A}} + \sum_{l \in \mathcal{C}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_t) \text{ s.t. slit 2}} e^{iS_0[l]/\hbar + i(q/\hbar) \int_l d\mathbf{x} \cdot \mathbf{A}}$$

と計算される. 第 1 項と第 2 項の位相差は, 片方の経路の逆をもう片方に足すことでできる閉曲線 ∂S について

$$\exp \left[\frac{iq}{\hbar} \oint_{\partial S} d\mathbf{x} \cdot \mathbf{A} \right] = \exp \left[\frac{iq}{\hbar} \int_S d\mathbf{S} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) \right] = \exp \left[\frac{iq}{\hbar} \Phi_S \right]$$

となる^{*1}.

- (1) 磁束が $\Phi_0 = 2\pi\hbar/q$ の整数倍の時は, 位相シフトがない場合と物理的に区別がつかない.
- (2) 実は, 静止した電荷の周りに磁束を動かしても全く同じ位相シフトが引き起こされる [?].

^{*1} 粒子が侵入できない領域にのみ磁場がかかっているとする. なお, 粒子の配位空間が単連結でないことが本質的に重要である. このとき, 領域 S をホモトピーで 1 点に収縮することで, 無限に細い管状の磁束 (flux tube) の概念に到達する.

2.1.2 Charge-Flux composite としてのエニオン

荷電粒子と無限に細い磁束管 (flux tube) が互いに束縛し合って近接しているものを考える。この対を 2 次元系における、 (q, Φ) なるチャージを持つ 1 つの粒子と見做してみよう。

さて、粒子 $i (= 1, 2)$ がチャージ (q, Φ) を持つとしよう。この 2 つの同種粒子の配位空間の基本群は前章の議論から \mathbb{Z}_2 であり、

- (1) 粒子 1 を 2 の周りに 1 周させる操作
- (2) 粒子の交換を 2 回行う操作

の 2 つが同じホモトピー類に属することがわかる。故に、これら 2 つの操作で得られる位相シフトは等しい。操作 (1) による位相シフトは AB 効果によるもので、 $e^{2iq\Phi/\hbar}$ である*2。故に、この粒子が 1 回交換することによって得られる位相シフトは $e^{iq\Phi/\hbar}$ であるが、これは $\theta = q\Phi/\hbar$ なる可換エニオンの統計性である。

次に、エニオンのフュージョン (fusion) を経験的に導入する。これは、エニオン $(q_1, \Phi_1), (q_2, \Phi_2)$ が「融合」してエニオン $(q_1 + q_2, \Phi_1 + \Phi_2)$ になる、と言うものであり、今回の場合だと電荷、磁束の保存則に由来すると考えることができる。エニオン (q, Φ) と $(-q, -\Phi)$ がフュージョンすると $I := (0, 0)$ になるだろう。この I をエニオンの真空とみなし*3、 $(-q, -\Phi)$ のことを (q, Φ) の反エニオン (anti-anyon) と見做す。反エニオンをエニオンの周りに一周させたときの位相シフトが $e^{-2i\theta}$ になることには注意すべきである。

2.1.3 トーラス上のエニオンの真空

トーラス $T^1 := S^1 \times S^1$ の上のエニオン系の基底状態 (真空) を考える。

トーラスには非自明なサイクルがちょうど 2 つあるので、それらを C_1, C_2 とおく。そして系の時間発展演算子のうち、次のようなものを考える：

\hat{T}_1 ある時刻に C_1 の 1 点において粒子-反粒子対を生成し、それらを C_1 上お互いに反対向きに動かし、有限時間経過後に C_1 の対蹠点で対消滅させる。

\hat{T}_2 ある時刻に C_2 の 1 点において粒子-反粒子対を生成し、それらを C_2 上お互いに反対向きに動かし、有限時間経過後に C_2 の対蹠点で対消滅させる。

\hat{T}_1, \hat{T}_2 は非可換であり、基底状態への作用を考える限り、フュージョンダイアグラムと braiding の等式から

$$\hat{T}_2 \hat{T}_1 = e^{-i2\theta} \hat{T}_1 \hat{T}_2 \quad (2.1.1)$$

が成り立つことが分かる。然るに、基底状態が張る部分空間に制限すると $[T_1, H] = [T_2, H] = 0$ なので*4、基底状態が縮退していることがわかる。

さて、 T_i はユニタリなので、 $T_1 |\alpha\rangle = e^{i\alpha} |\alpha\rangle$ とおける。この時 (2.1.1) より

$$T_1(T_2 |\alpha\rangle) = e^{i(\alpha+2\theta)} T_2 |\alpha\rangle$$

*2 2 がつくのは、粒子 1 の q が粒子 2 の Φ の周りを 1 周する AB 効果だけでなく、粒子 1 の Φ が粒子 2 の q の周りを 1 周する AB 効果の寄与があるからである。一般に、粒子 i のチャージが (q_i, Φ_i) ならば $e^{i(q_1\Phi_2 + q_2\Phi_1)/\hbar}$ の位相シフトが起こる。

*3 しかし、 I のことは粒子として捉える。

*4 基底状態 $|0\rangle$ と $\hat{T}_1 |0\rangle$ は同じエネルギーである。

である。つまり、 $|\alpha\rangle$ が基底状態ならば $|\alpha + 2\theta\rangle = T_2 |\alpha\rangle$ もまた基底状態である。この操作を続けて、基底状態 $|\alpha + 2n\theta\rangle = (T_2)^n |\alpha\rangle$ ($n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$) を得る。特に $\theta = \pi p/m$ (p, m は互いに素) である場合を考えると、基底状態は m 重縮退を示している。

2.2 可換 Chern-Simons 理論の経験的導入

ゲージ場^{*5} $A_\alpha = (a_0, a_1, a_2)$ が印加された N 粒子 2 次元系であって、ラグランジアンが

$$L = L_0 + \int_{\Sigma} d^2x \left(\frac{\mu}{2} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} A_\alpha \partial_\beta A_\gamma - j^\alpha A_\alpha \right) =: L_0 + \int_{\Sigma} d^2x \mathcal{L} \quad (2.2.1)$$

と書かれるものを考える。ただし、 L_0 は場と粒子の結合を無視したときの粒子のラグランジアンであり、空間を表す多様体を Σ で書いた。粒子 n はチャージ q_n を持つものとし、 $j^\alpha = (j^0, \mathbf{j})$ は

$$j^0(\mathbf{x}) := \sum_{n=1}^N q_n \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_n),$$

$$\mathbf{j}(\mathbf{x}) := \sum_{n=1}^N q_n \dot{\mathbf{x}}_n \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_n)$$

と定義される粒子のカレントである。ラグランジアン密度 \mathcal{L} の第 1 項は場自身を記述し、第 2 項は場と粒子の結合を記述する。

2.2.1 ゲージ不変性

ラグランジアン (2.2.1) のゲージ不変性は次のようにしてわかる：ゲージ変換

$$A_\alpha \longrightarrow A_\alpha + \partial_\alpha \chi$$

による \mathcal{L} の変化は

$$\frac{\mu}{2} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \partial_\alpha \chi \partial_\beta A_\gamma + \frac{\mu}{2} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} A_\alpha \partial_\beta \partial_\gamma \chi + \cancel{\frac{\mu}{2} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \partial_\alpha \chi \partial_\beta \partial_\gamma \chi} - j^\alpha \partial_\alpha \chi$$

であるから、空間積分を実行すると

$$\begin{aligned} & \int_{\Sigma} d^2x \frac{\mu}{2} \partial_\alpha (\epsilon^{\alpha\beta\gamma} \chi \partial_\beta A_\gamma) - \int_{\Sigma} d^2x \frac{\mu}{2} \cancel{\epsilon^{\alpha\beta\gamma} \chi \partial_\alpha \partial_\beta A_\gamma} - \int_{\Sigma} d^2x \partial_\alpha (j^\alpha \chi) + \int_{\Sigma} d^2x \cancel{\partial_\alpha j^\alpha \chi} \\ &= \int_{\partial\Sigma} dS_\alpha \left(\frac{\mu}{2} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \chi \partial_\beta A_\gamma - j^\alpha \chi \right) \end{aligned}$$

となる。ただしチャージの保存則 $\partial_\alpha j^\alpha = 0$ を使った。このことから、もし空間を表す多様体 Σ の境界が $\partial\Sigma = \emptyset$ ならば^{*6} ラグランジアンはゲージ不変である。

^{*5} 一般相対論に倣い、時空を表す多様体 \mathcal{M} の座標のうち時間成分を x^0 、空間成分を x^1, x^2 とする。

^{*6} このような多様体の中で重要なのが閉多様体 (closed manifold) である。

2.2.2 運動方程式

ラグランジアン密度 \mathcal{L} から導かれる Euler-Lagrange 方程式は

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial A_\alpha} = \partial_\beta \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\beta A_\alpha)} \right)$$

である.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial A_\alpha} &= \frac{\mu}{2} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \partial_\beta A_\gamma - j^\alpha, \\ \partial_\beta \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\beta A_\alpha)} \right) &= \partial_\beta \left(\frac{\mu}{2} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} A_\alpha \right) = -\frac{\mu}{2} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \partial_\beta A_\gamma \end{aligned}$$

なのでこれは

$$j^\alpha = \mu \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \partial_\beta A_\gamma$$

となる. 特に第 0 成分は, 「磁場」 $\mathbf{b} := \nabla \times \mathbf{A}$ を導入することで

$$\sum_{n=1}^N \frac{q_n}{\mu} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_n) = b^0$$

となる. つまり, 位置 \mathbf{x}_n に強さ q_n/μ の磁束管が点在している, という描像になり, charge-flux composite を説明できている.

2.2.3 プロパゲーター

簡単のため, 全ての粒子のチャージが等しく q であるとする. N 粒子の配位空間 \mathcal{C} における初期配位と終了時の配位をそれぞれ $\{\mathbf{x}_i\}, \{\mathbf{x}_f\}$ とし, それらを繋ぐ経路全体の集合を $\mathcal{C}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f)$ と書くと, プロパゲーターは経路積分によって

$$\sum_{l \in \mathcal{C}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f)} e^{iS_0[l]/\hbar} \int_{\mathcal{M}} \mathcal{D}(A_\mu(x)) e^{iS_{CS}[A_\mu(x)]/\hbar} e^{i(q/\hbar) \int_l dx^\alpha A_\alpha(x)}$$

と計算される. ここに $\mathcal{D}(A_\mu(x))$ は汎関数積分の測度を表す. 詳細は後述するが, 場に関する汎関数積分を先に実行してしまうと, 実は

$$\sum_{l \in \mathcal{C}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_f)} e^{iS_0[l]/\hbar + i\theta W(l)}$$

の形になることが知られている. ここに $W(l)$ は, 経路 l の巻きつき数である. 経路に依存する位相因子 $e^{i\theta W(l)}$ は前章で議論した $\pi_1 \mathcal{C}$ の 1 次元ユニタリ表現そのものであり, エニオンの統計性が発現する機構が Chern-Simons 項により説明できることを示唆している.

2.2.4 真空中の可換 Chern-Simons 理論

粒子が存在しないとき、経路積分は

$$Z(\mathcal{M}) := \int_{\mathcal{M}} \mathcal{D}A_\mu(x) e^{iS_{CS}[A_\mu(x)]/\hbar}$$

の形をする。 $Z(\mathcal{M})$ は \mathcal{M} についてホモトピー不変であり、**分配関数** (partition function) と呼ばれる。 $Z(\mathcal{M})$ が TQFT において重要な役割を果たすことを後の章で見る。

2.2.5 正準量子化

$A_0 = 0$ なるゲージをとると、ラグランジアン密度における Chern-Simons 項は $-A_1\partial_0 A_2 + A_2\partial_0 A_1$ の形になる。これは A_1 (resp. A_2) が A_2 (resp. A_1) の共役運動量であることを意味するので、正準量子化を行うならば

$$[A_1(\mathbf{x}), A_2(\mathbf{y})] = \frac{i\hbar}{\mu} \delta^2(\mathbf{x} - \mathbf{y})$$

を要請する^{*7}。

さて、このときトーラス T^2 上の2つのサイクル C_1, C_2 に対して Wilson ループ

$$W_j = \exp \left(\frac{iq}{\hbar} \oint_{C_j} d\mathbf{x} \cdot \mathbf{A} \right)$$

を考える。 $[A, B]$ が c 数である場合の BCH 公式から

$$W_1 W_2 = e^{iq^2/(\mu\hbar)} W_2 W_1$$

を得るが、これは (2.1.1) を説明している。つまり、演算子 T_1, T_2 とは Wilson loop のことだったのである^{*8}。

2.3 非可換 Chern-Simons 理論の経験的導入

この節では自然単位系を使う。前節を一般化して、ゲージ場 $A_\mu(x)$ がある Lie 代数 \mathfrak{g} に値をとるものとしよう。つまり、Lie 代数 \mathfrak{g} の基底を $\sigma_a/(2i)$ とすると^{*9}

$$A_\mu(x) = A_\mu^a(x) \frac{\sigma_a}{2i}$$

と書かれるような状況を考える^{*10}。 $\sigma_a \in \mathfrak{g}$ が一般に非可換であることから、このような理論は非可換 Chern-Simons 理論と呼ばれる。

時空多様体 \mathcal{M} 上の閉曲線 γ に沿った **Wilson loop** は、**経路順序積** (path ordering) \mathcal{P} を用いて

$$W_\gamma := \text{Tr} \left[\mathcal{P} \exp \left(\oint_\gamma dx^\mu A_\mu(x) \right) \right]$$

と定義される。Aharonov-Bohm 位相の一般化という気持ちであるが、経路 γ の異なる2点 x, y を取ってきたときに $A_\mu(x)$ と $A_\mu(y)$ が一般に非可換であることが話をややこしくする。

^{*7} しかし、トーラス上の座標をどのように取るかと言うことは問題である。

^{*8} 疑問：座標の時間成分はどこへ行ったのか？

^{*9} 因子 $1/(2i)$ は物理学における慣習である。ややこしいことに、文献によってこの因子が異なる場合がある。

^{*10} ゲージ接続が Lie 代数に値をとる 1-形式である、ということ。

2.3.1 ゲージ不変性

非可換 Chern-Simons 理論におけるゲージ変換は, $U: \mathcal{M} \rightarrow G$ を用いて

$$A_\mu(x) \rightarrow U(x)(A_\mu(x) + \partial_\mu)U(x)^{-1} \quad (2.3.1)$$

の形をする. このゲージ変換が Wilson loop を不変に保つことを確認しておこう.

\mathcal{M} の任意の 2 点 $x_i, x_f \in \mathcal{M}$ を結ぶ曲線 $\gamma: [t_i, t_f] \rightarrow \mathcal{M}$ をとり, **Wilson line** を

$$\tilde{W}_\gamma(x, y) := \mathcal{P} \exp \left(\int_C dx^\mu A_\mu(x) \right)$$

で定義する. $[t_i, t_f]$ の分割 $t_i := t_0 < t_1 < \dots < t_N := t_f$ を与えて $x_i := \gamma(t_i)$, $dx_i := x_{i+1} - x_i$ とおく^{*11}と,

$$\begin{aligned} \tilde{W}_\gamma(x_i, x_f) &= \mathcal{P} \exp \left(\int_{x_i}^{x_1} dx^\mu A_\mu(x) + \int_{x_1}^{x_2} dx^\mu A_\mu(x) + \dots + \int_{x_{N-1}}^{x_f} dx^\mu A_\mu(x) \right) \\ &:= \lim_{N \rightarrow \infty} \exp \left(\int_{x_i}^{x_1} dx^\mu A_\mu(x) \right) \exp \left(\int_{x_1}^{x_2} dx^\mu A_\mu(x) \right) \dots \exp \left(\int_{x_{N-1}}^{x_f} dx^\mu A_\mu(x) \right) \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \tilde{W}_{\gamma|_{[t_i, t_1]}}(x_i, x_1) \tilde{W}_{\gamma|_{[t_1, t_2]}}(x_1, x_2) \dots \tilde{W}_{\gamma|_{[t_{N-1}, t_f]}}(x_{N-1}, x_f) \end{aligned}$$

と書ける. N が十分大きい時は $0 \leq \forall i \leq N-1$ に対して $|dx_i|$ が十分小さく,

$$\begin{aligned} \tilde{W}_{\gamma|_{[t_i, t_{i+1}]}}(x_i, x_{i+1}) &\approx \exp \left(\int_{x_i}^{x_{i+1}} dx^\mu A_\mu(x) \right) \\ &\approx 1 + \int_{x_i}^{x_{i+1}} dx^\mu A_\mu(x) \\ &\approx 1 + A_\mu(x_i) dx_i^\mu \end{aligned}$$

と書ける^{*12}. このときゲージ変換 (2.3.1) に伴って

$$\begin{aligned} \tilde{W}_{\gamma|_{[t_i, t_{i+1}]}}(x_i, x_{i+1}) &\rightarrow 1 + U(x_i)(A_\mu(x_i) + \partial_\mu)U(x_i)^{-1} dx_i^\mu \\ &\approx U(x_i)(1 + A_\mu(x_i) dx_i^\mu)(U(x_i)^{-1} + \partial_\mu(U(x_i)^{-1}) dx_i^\mu) \\ &\approx U(x_i)\tilde{W}_{\gamma|_{[t_i, t_{i+1}]}}(x_i, x_{i+1})U(x_{i+1})^{-1} \end{aligned}$$

と変換するので, 結局 $x_i, x_f \in \mathcal{M}$ を繋ぐ Wilson line がゲージ変換 (2.3.1) に伴って

$$\tilde{W}_\gamma(x_i, x_f) \rightarrow U(x_i)\tilde{W}_\gamma(x_i, x_f)U(x_f)^{-1}$$

と変換することがわかった. Wilson loop の場合は $x_i = x_f$ でかつトレースをとるので, ゲージ不変になる.

^{*11} dx_i は, 厳密には 2 点 x_i, x_{i+1} を含むある \mathcal{M} のチャート $(U, (x^\mu))$ をとってきた時の座標関数の値の差 $dx_i^\mu := x^\mu(x_{i+1}) - x^\mu(x_i)$ として理解する.

^{*12} $N \rightarrow \infty$ の極限で等式になる.

2.3.2 Chern-Simons 作用

いささか天下りのだが、**Chern-Simons action** を

$$S_{\text{CS}}[A_\mu] := \frac{k}{4\pi} \int_{\mathcal{M}} d^3x \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \text{Tr} \left[A_\alpha \partial_\beta A_\gamma + \frac{2}{3} A_\alpha A_\beta A_\gamma \right]$$

により定義する。第 2 項は可換な場合には必ず零になるので前節では登場しなかった。\$S_{\text{CS}}\$ が時空 \$\mathcal{M}\$ の計量によらない^{*13}ことは、ゲージ場を Lie 代数值 1-形式 \$A \in \Omega^1(\mathcal{M}) \otimes \mathfrak{g}\$ として書き表したときに

$$S_{\text{CS}}[A] = \frac{k}{4\pi} \int_{\mathcal{M}} \text{Tr} \left(A \wedge dA + \frac{2}{3} A \wedge A \wedge A \right)$$

と書けることからわかる^{*14}。

\$S_{\text{CS}}\$ にゲージ変換 (2.3.1) を施した結果は

$$S_{\text{CS}}[A_\mu] \longrightarrow S_{\text{CS}}[A_\mu] + 2\pi\nu k, \quad (2.3.2)$$

$$\text{w/ } \nu := \frac{1}{24\pi^2} \int_{\mathcal{M}} d^3x \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \text{Tr} [(U^{-1} \partial_\alpha U)(U^{-1} \partial_\beta U)(U^{-1} \partial_\gamma U)]$$

となる。\$\nu\$ は写像 \$U: \mathcal{M} \longrightarrow G\$ の**巻きつき数** (winding number), もしくは **Pontryagin index** と呼ばれ、常に整数値をとる。この極めて非自明な結果についても後述する。(2.3.2) から、\$S_{\text{CS}}\$ は厳密にはゲージ不変ではない。然るに、もし \$k \in \mathbb{Z}\$ ならば (このとき \$k\$ の値は **level** と呼ばれる), 分配関数 \$Z(\mathcal{M})\$ がゲージ不変な形になってくれるので問題ない、と考える。2+1 次元においては、1 つのゲージ場からなる作用であって

- トポロジカル不変性 (i.e. 計量不変性)
- 上述の意味のゲージ不変性

の 2 つを充たすものは他にない。

2.4 古典的ゲージ理論

時空の多様体を \$\mathcal{M}\$ と書く。

場^{*15} \$\varphi: \mathcal{M} \longrightarrow \mathbb{K}^N\$, \$x \mapsto (\varphi_1(x), \dots, \varphi_N(x))\$ が線型 Lie 群 \$G \subset \text{GL}(N, \mathbb{K})\$ で記述される^{*16}内部対称性を持っているような系を考える。つまり、ゲージ原理を要請し、任意の \$C^\infty\$ 写像 \$U: \mathcal{M} \longrightarrow G\$ に対して^{*17}, 系のラグランジアン密度の場に関する項 \$\mathcal{L}[\varphi_\mu(x)]\$ が \$\mathcal{L}[[U(x)]_i^j \varphi_j(x)] = \mathcal{L}[\varphi_i(x)]\$ を充たすとする。もしくは、場 \$\varphi: \mathcal{M} \longrightarrow \mathbb{K}^N\$ であって、時空の各点 \$x \in \mathcal{M}\$ および任意の \$C^\infty\$ 写像 \$U: \mathcal{M} \longrightarrow G\$ に対して \$\varphi(x) \longrightarrow U(x)\varphi(x)\$ と変換する^{*18} ものを考えるととっても良い。

^{*13} 計量不変 (metric invariant) であると言う。

^{*14} ... と言うのは微妙に的を外している。より正確には 2+1 次元多様体 \$\mathcal{M}\$ を境界を持つような 4 次元多様体 \$\mathcal{N}\$ を用意し、\$\mathcal{N}\$ の作用 \$S[A] := k/(4\pi) \int_{\mathcal{N}} \text{Tr}(F \wedge F)\$ を部分積分することで \$S_{\text{CS}}\$ の別の定義が与えられる。

^{*15} この段階では、場とはその配位を記述する空間 \$F\$ (これは \$C^\infty\$ 多様体だったりベクトル空間だったりする) と \$C^\infty\$ 写像 \$\varphi: \mathcal{M} \longrightarrow F\$ の組のことと考える。この描像は後にファイバー束の \$C^\infty\$ 切断として定式化される。

^{*16} ここでは \$\mathbb{K} = \mathbb{R}, \mathbb{C}\$ としておく。

^{*17} 内部対称性という言葉を使うのは、\$U\$ が定数写像とは限らないことを意味する。

^{*18} 一般相対論の数学的定式化におけるテンソル場の変換性は、時空の多様体 \$\mathcal{M}\$ 上の一般座標変換 (i.e. チャートの取り替え) に由

この系を経路積分により量子化することを見据えて、このような変換性を充たす全ての場がなす空間の幾何学を考察すると見通しが良いだろう。そのため、まず時空上の無限小だけ離れた2点 $x_i, x_f \in \mathcal{M}$ における場の配位 $\varphi(x_i), \varphi(x_f)$ を比較しよう。内部自由度による変換性を議論したいので、 $\varphi(x_f) - \varphi(x_i)$ なる量を調べても意味がない。 x_i, x_f を結ぶ C^∞ 曲線 $\gamma: [t_i, t_f] \rightarrow \mathcal{M}$ を持ってきて、 γ に沿って $\varphi(x_i)$ を x_f まで流してやるのが良い。つまり、場の配位を記述する空間 \mathbb{K}^N 上の C^∞ 曲線 $\varphi^{(\gamma)} := \varphi \circ \gamma: [t_i, t_f]$ を考えれば、量 $\varphi(x_f) - \varphi^{(\gamma)}(t_f)$ は $U(x_f) \in G$ による変換を受けるはずである。 x_i, x_f の両方を含む \mathcal{M} のチャート $(V, (x^\mu))$ を持ってきて成分計算すると、 $dx := x_f - x_i$ が^{*19}微小なので Taylor 展開において dx の1次の項まで残すことで

$$\begin{aligned}\varphi_i^{(\gamma)}(t_f) &:= \varphi_i(x_i) - [A_\mu(x)]_i^j \varphi_j(x) dx^\mu \\ \varphi(x_f) &= \varphi(x_i) + \partial_\mu \varphi(x) dx^\mu\end{aligned}\tag{2.4.1}$$

と書けるはずである。ただし、式 (2.4.1) の右辺によって $\dim \mathcal{M}$ 個の成分を持つ新しい場 $A_\mu: \mathcal{M} \rightarrow \text{GL}(N, \mathbb{K})$ を定義した。この場は**ゲージ場**と呼ばれる。

ゲージ場 A_μ を時空の各点 $x \in \mathcal{M}$ における変換性によって特徴付けよう。そのためには、量

$$\varphi(x_f) - \varphi^{(\gamma)}(t_f) = (\partial_\mu \varphi(x) + A_\mu(x) \varphi(x)) dx^\mu$$

が $U(x_f) \in G$ による変換を受けることに注目すれば良い。つまり、**共変微分**と呼ばれる線型写像を $\mathcal{D}_\mu(x) := \partial_\mu + A_\mu(x)$ で定義すると、 $\forall x \in \mathcal{M}$ における、内部対称性による変換

$$\varphi(x) \longrightarrow \tilde{\varphi}(x) := U(x) \varphi(x)\tag{2.4.2}$$

に伴って $\mathcal{D}_\mu(x) \varphi(x)$ は

$$\mathcal{D}_\mu(x) \varphi(x) \longrightarrow \tilde{\mathcal{D}}_\mu(x) \tilde{\varphi}(x) := U(x) \mathcal{D}_\mu(x) \varphi(x)$$

の変換を受ける。このことから、場 φ の変換 (2.4.2) に伴う共変微分自身の変換則は

$$\mathcal{D}_\mu(x) \longrightarrow \tilde{\mathcal{D}}_\mu(x) = U(x) \mathcal{D}_\mu(x) U(x)^{-1}$$

となる。従って場 $A_\mu: \mathcal{M} \rightarrow \text{GL}(N, \mathbb{K})$ の、場 φ の変換 (2.4.2) に伴う変換則が

$$A_\mu(x) \longrightarrow U(x) (\partial_\mu + A_\mu(x)) U(x)^{-1}$$

だと分かった。このような場の変換則を**ゲージ変換** (gauge transformation) と呼ぶ。

2.4.1 主束と内部対称性の定式化

ゲージ場は、主束の接続として定式化できる。特に、主束の同伴ベクトル束が重要である。

まずファイバー束と主束を定義し、内部対称性を持つ場の記述には主束の同伴ベクトル束が適していることを見る^{*20}。 C^∞ 多様体 M の微分同相群 (diffeomorphism group) $\text{Diff } M$ とは、

来するものであった。同じように、ここで考えている場の変換性はどのような数学的定式化に由来するのかということを考えると、時空 \mathcal{M} を底空間とする主束 $G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} \mathcal{M}$ の同伴ベクトル束 $\mathbb{K}^N \hookrightarrow P \times_P \mathbb{K}^N \xrightarrow{q} \mathcal{M}$ における、 \mathcal{M} のチャートの取り替えに伴う局所自明化の取り替え (i.e. 変換関数のファイバーへの作用) の概念に行き着くのである。詳細は次の小節で議論する。

^{*19} 厳密にはこれは座標関数の差 $dx^\mu := x^\mu(x_f) - x^\mu(x_i)$ の絶対値が小さいことを主張している。

^{*20} 従って、この小節で行うのはゲージ場が登場する舞台の定式化であって、ゲージ場自身の定式化は次の小節で行う。

- 台集合 $\text{Diff } M := \{ f: M \rightarrow M \mid \text{微分同相写像} \}$
- 単位元を恒等写像
- 積を写像の合成

として構成される群のことを言う。

定義 2.1: Lie 群の作用

- Lie 群 G の C^∞ 多様体 M への**左作用**とは、群準同型 $\rho: G \rightarrow \text{Diff } M$ であって写像

$$\blacktriangleright: G \times M \rightarrow M, (g, x) \mapsto \rho(g)(x)$$

が C^∞ 写像となるようなもののこと。 $g \blacktriangleright x := \blacktriangleright(g, x)$ と略記する。

- Lie 群 G の C^∞ 多様体 M への**右作用**とは、群準同型 $\rho: G^{\text{op}} \rightarrow \text{Diff } M$ であって写像

$$\blacktriangleleft: M \times G \rightarrow M, (x, g) \mapsto \rho(g)(x)$$

が C^∞ 写像となるようなもののこと。 $x \blacktriangleleft g := \blacktriangleleft(x, g)$ と略記する。

- Lie 群の左 (resp. 右) 作用が**自由** (free) であるとは、 $\forall x \in X, \forall g \in G \setminus \{1_G\}, g \blacktriangleright x \neq x$ (resp. $x \blacktriangleleft g \neq x$) を満たすことを言う。
- Lie 群の左 (resp. 右) 作用が**効果的** (effective) であるとは、 $\rho: G \rightarrow \text{Diff } M$ (resp. $\rho: G^{\text{op}} \rightarrow \text{Diff } M$) が単射であることを言う。

定義 2.2: C^∞ ファイバー束

Lie 群 G が C^∞ 多様体 F に**効果的に作用**しているとする。 C^∞ **ファイバー束** (fiber bundle) とは、

- C^∞ 多様体 E, B, F
- C^∞ の全射 $\pi: E \rightarrow B$
- Lie 群 G と、 G の F への**左作用** $\blacktriangleright: G \times F \rightarrow F$
- B の開被覆 $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$
- 微分同相写像の族

$$\{\varphi_\lambda: \pi^{-1}(U_\lambda) \rightarrow U_\lambda \times F\}_{\lambda \in \Lambda}$$

であって、 $\forall \lambda \in \Lambda$ に対して図 2.1 を可換にするもの。

$$\begin{array}{ccc} \pi^{-1}(U_\lambda) & \xrightarrow{\varphi} & U_\lambda \times F \\ \pi \downarrow & \swarrow \text{proj}_1 & \\ U_\lambda & & \end{array}$$

図 2.1: 局所自明性

- C^∞ 写像の族

$$\{t_{\alpha\beta}: B \rightarrow G \mid \forall (p, f) \in (U_\alpha \cap U_\beta) \times F, \varphi_\beta^{-1}(p, f) = \varphi_\alpha^{-1}(p, t_{\alpha\beta}(p) \blacktriangleright f)\}_{\alpha, \beta \in \Lambda}$$

の 6 つのデータの組みのこと。記号としては (E, π, B, F) や $F \hookrightarrow E \xrightarrow{\pi} B$ と書く。

以下ではファイバー束と言ったら C^∞ ファイバー束のことを指すようにする。ファイバー束 (E, π, B, F) に関して、

- E を全空間 (total space)
- B を底空間 (base space)
- F をファイバー (fiber)
- π を射影 (projection)
- φ_λ を局所自明化 (local trivialization)
- $t_{\alpha\beta}$ を変換関数 (transition map)

と呼ぶ^{*21}。また、射影 π による 1 点集合 $\{b\}$ の逆像 $\pi^{-1}(\{b\}) \subset E$ のことを点 b のファイバー (fiber) と呼び、 $F|_b$ と書く。

定義 2.3: ベクトル束

ファイバーを n 次元 \mathbb{K} -ベクトル空間とし、構造群を $\mathrm{GL}(n, \mathbb{K})$ とするようなファイバー束のことを階数 n のベクトル束 (vector bundle of rank n) と呼ぶ。

【例 2.4.1】接束

n 次元 C^∞ 多様体 M の接束は、ベクトル束 $(TM, \pi, M, \mathbb{R}^n)$ である。実際、 M のチャート $(U_\lambda, (x^\mu))$ に対して局所自明化は

$$\varphi_\lambda: \pi^{-1}(U_\lambda) \longrightarrow U_\lambda \times \mathbb{R}^n, \left(p, v^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} \Big|_p \right) \longmapsto \left(p, \begin{bmatrix} v^1 \\ \vdots \\ v^n \end{bmatrix} \right)$$

となり、チャート $(U_\alpha, (x^\mu)), (U_\beta, (y^\mu))$ に対して

$$\varphi_\beta^{-1}(p, (v^1, \dots, v^n)) = \varphi_\alpha^{-1}\left(p, \begin{bmatrix} \frac{\partial y^1}{\partial x^1}(p) & \cdots & \frac{\partial y^1}{\partial x^n}(p) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial y^n}{\partial x^1}(p) & \cdots & \frac{\partial y^n}{\partial x^n}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^1 \\ \vdots \\ v^n \end{bmatrix} \right)$$

となる。故に変換関数は

$$t_{\alpha\beta}(p) := \begin{bmatrix} \frac{\partial y^1}{\partial x^1}(p) & \cdots & \frac{\partial y^1}{\partial x^n}(p) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial y^n}{\partial x^1}(p) & \cdots & \frac{\partial y^n}{\partial x^n}(p) \end{bmatrix} \in \mathrm{GL}(n, \mathbb{R})$$

で、ファイバーへの構造群の左作用とはただ単に n 次元の数ベクトルに行列を掛けることである。

^{*21} 紛らわしくないとき、ファイバー束 (E, π, B, F) のことを $\pi: E \rightarrow B$ 、または単に E と略記することがある。

定義 2.4: 束写像

ファイバー F と構造群 G を共有する二つのファイバー束 $\xi_i = (E_i, \pi_i, B_i, F)$ を与える.

- ξ_1 から ξ_2 への**束写像** (bundle map) とは, 二つの C^∞ 写像 $f: B_1 \rightarrow B_2$, $\tilde{f}: E_1 \rightarrow E_2$ の組であって図 2.2

$$\begin{array}{ccc} E_1 & \xrightarrow{\tilde{f}} & E_2 \\ \pi_1 \downarrow & & \downarrow \pi_2 \\ B_1 & \xrightarrow{f} & B_2 \end{array}$$

図 2.2: 束写像

を可換にし, かつ底空間 B_1 の各点 b において, 点 b のファイバー $\pi_1^{-1}(\{b\}) \subset E_1$ への \tilde{f} の制限

$$\tilde{f}|_{\pi_1^{-1}(\{b\})}: \pi_1^{-1}(\{b\}) \rightarrow \tilde{f}(\pi_1^{-1}(\{b\})) \subset E_2$$

が微分同相写像になっているものを言う.

- ファイバー束 ξ_1 と ξ_2 が**同型** (isomorphic) であるとは, $B_1 = B_2 = B$ であってかつ $f: B \rightarrow B$ が恒等写像となるような束写像 $\tilde{f}: E_1 \rightarrow E_2$ が存在することを言う. 記号としては $\xi_1 \simeq \xi_2$ とかく.

$$\begin{array}{ccc} E_1 & \xrightarrow{\tilde{f}} & E_2 \\ \pi_1 \searrow & & \swarrow \pi_2 \\ & B & \end{array}$$

図 2.3: ファイバー束の同型

- 積束 $(B \times F, \text{proj}_1, B, F)$ と同型なファイバー束を**自明束** (trivial bundle) と呼ぶ.

ファイバー束 (E, π, B, F) は, 射影 π によってファイバー F の情報を失う. F を復元するためにも, $s: B \rightarrow E$ なる写像の存在が必要であろう.

定義 2.5: C^∞ 切断

ファイバー束 $\xi = (E, \pi, B, F)$ の C^∞ **切断** (cross section) とは, C^∞ 写像 $s: B \rightarrow E$ であって $\pi \circ s = \text{id}_B$ となるもののことを言う.

ξ の切断全体の集合を $\Gamma(B, E)$ あるいは $\Gamma(E)$ と書く.

$\xi = (E, \pi, B, F)$ を**ファイバー束**とする. 底空間 B の開被覆 $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ をとると, 定義 2.2 から, どの $\alpha \in \Lambda$ に対しても局所自明性 (図 2.4a) が成り立つ. ここでもう一つの $\beta \in \Lambda$ をとり, $U_\alpha \cap U_\beta$ に関して局所自明性の図式を横に並べることで, 自明束 $\text{proj}_1: (U_\alpha \cap U_\beta) \times F \rightarrow U_\alpha \cap U_\beta$ の**束の自己同型** (図 2.4c) が

得られる.

$$\begin{array}{ccc}
 U_\alpha \times F & \xleftarrow{\varphi_\alpha} & \pi^{-1}(U_\alpha) \\
 & \searrow \text{proj}_1 & \downarrow \pi \\
 & & U_\alpha
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccc}
 \pi^{-1}(U_\beta) & \xrightarrow{\varphi_\beta} & U_\beta \times F \\
 \downarrow \pi & \swarrow \text{proj}_1 & \\
 U_\beta & &
 \end{array}$$

(a) U_α に関する局所自明性

(b) U_β に関する局所自明性

$$\begin{array}{ccc}
 (U_\alpha \cap U_\beta) \times F & \xrightarrow{\varphi_\beta \circ \varphi_\alpha^{-1}} & (U_\alpha \cap U_\beta) \times F \\
 \searrow \text{proj}_1 & & \swarrow \text{proj}_1 \\
 & U_\alpha \cap U_\beta &
 \end{array}$$

(c) 自明束 $(U_\alpha \cap U_\beta) \times F$ の自己同型

図 2.4: 局所自明性の結合

全ての $U_\alpha \cap U_\beta$ に関する変換関数の族 $\{t_{\alpha\beta}\}$ が $\forall b \in U_\alpha \cap U_\beta \cap U_\gamma$ に対して条件

$$t_{\alpha\beta}(b)t_{\beta\gamma}(b) = t_{\alpha\gamma}(b) \quad (2.4.3)$$

を満たすことは図式 2.4 より明かである. 次の命題は, ファイバー束 (E, π, B, F) を構成する「素材」には

- 底空間となる C^∞ 多様体 B
- ファイバーとなる C^∞ 多様体 F
- Lie 群 G と, その F への左作用 $\blacktriangleright: G \times F \longrightarrow F$
- B の開被覆 $\{U_\lambda\}$
- (2.4.3) を満たす C^∞ 写像の族 $\{t_{\alpha\beta}: U_\beta \cap U_\alpha \rightarrow G\}_{\alpha, \beta \in \Lambda}$

があれば十分であることを主張する:

命題 2.1: ファイバー束の構成

- C^∞ 多様体 B, F
- Lie 群 G と, G の F への左作用 $\blacktriangleright: G \times F \longrightarrow F$
- B の開被覆 $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$
- コサイクル条件 (2.4.3) を満たす C^∞ 関数の族 $\{t_{\alpha\beta}: U_\beta \cap U_\alpha \rightarrow G\}$

を与える. このとき, 構造群 G と変換関数 $\{t_{\alpha\beta}\}_{\alpha, \beta \in \Lambda}$ を持つファイバー束 $\xi = (E, \pi, B, F)$ が存在する.

証明 まず手始めに, cocycle 条件 (2.4.3) より

$$t_{\alpha\alpha}(b)t_{\alpha\alpha}(b) = t_{\alpha\alpha}(b), \quad \forall b \in U_\alpha$$

だから $t_{\alpha\alpha}(b) = 1_G$ であり, また

$$t_{\alpha\beta}(b)t_{\beta\alpha}(b) = t_{\alpha\alpha}(b) = 1_G, \quad \forall b \in U_\alpha \cap U_\beta$$

だから $t_{\beta\alpha}(b) = t_{\alpha\beta}(b)^{-1}$ である.

開被覆 $\{U_\lambda\}$ の添字集合を Λ とする. このとき $\forall \lambda \in \Lambda$ に対して, $U_\lambda \subset B$ には底空間 B からの相対位相を入れ, $U_\lambda \times F$ にはそれと F の位相との積位相を入れることで, 直和位相空間

$$\mathcal{E} := \coprod_{\lambda \in \Lambda} U_\lambda \times F$$

を作ることができる^{*22}. \mathcal{E} の任意の元は $(\lambda, b, f) \in \Lambda \times U_\lambda \times F$ と書かれる.

さて, \mathcal{E} 上の二項関係 \sim を以下のように定める:

$$(\alpha, b, f) \sim (\beta, b, t_{\alpha\beta}(b) \blacktriangleright f) \quad \forall b \in U_\alpha \cap U_\beta, \forall f \in F$$

\sim が同値関係の公理を充たすことを確認する:

反射律 冒頭の議論から $t_{\alpha\alpha}(b) = 1_G$ なので良い.

対称律 冒頭の議論から $t_{\beta\alpha}(b) = t_{\alpha\beta}(b)^{-1}$ なので,

$$\begin{aligned} (\alpha, b, f) &\sim (\beta, c, h) \\ \implies b &= c \in U_\alpha \cap U_\beta \text{ かつ } f = t_{\alpha\beta}(b) \blacktriangleright h \\ \implies c &= b \in U_\alpha \cap U_\beta \text{ かつ } h = t_{\alpha\beta}(b)^{-1} \blacktriangleright f = t_{\beta\alpha}(b) \blacktriangleright f \\ \implies (\beta, c, h) &\sim (\alpha, b, f). \end{aligned}$$

推移律 cocycle 条件 (2.4.3) より

$$\begin{aligned} (\alpha, b, f) &\sim (\beta, c, h) \text{ かつ } (\beta, c, h) \sim (\gamma, d, k) \\ \implies b &= c \in U_\alpha \cap U_\beta \text{ かつ } c = d \in U_\beta \cap U_\gamma \text{ かつ } f = t_{\alpha\beta}(b) \blacktriangleright h, h = t_{\beta\gamma}(c) \blacktriangleright k \\ \implies b &= d \in U_\alpha \cap U_\beta \cap U_\gamma \text{ かつ } f = (t_{\alpha\beta}(b)t_{\beta\gamma}(b)) \blacktriangleright k = t_{\alpha\gamma}(b) \blacktriangleright k \\ \implies (\alpha, b, f) &\sim (\gamma, d, k). \end{aligned}$$

したがって \sim は同値関係である. \sim による \mathcal{E} の商集合を E と書き, 商写像を $\text{pr}: \mathcal{E} \rightarrow E, (\alpha, b, f) \mapsto [(\alpha, b, f)]$ と書くことにする.

集合 E に商位相を入れて E を位相空間にする. このとき商位相の定義から開集合 $\{\alpha\} \times U_\alpha \times F \subset \mathcal{E}$ は pr によって E の開集合 $\text{pr}(\{\alpha\} \times U_\alpha \times F) \subset E$ に移される. ゆえに E は $\{\text{pr}(\{\alpha\} \times U_\alpha \times V_\beta)\}$ を座標近傍にもつ C^∞ 多様体である (ここに $\{V_\beta\}$ は, C^∞ 多様体 F の座標近傍である).

次に C^∞ の全射 $\pi: E \rightarrow B$ を

$$\pi([(\alpha, b, f)]) := b$$

と定義すると, これは $\forall \alpha \in \Lambda$ に対して微分同相写像^{*23}

$$\varphi_\alpha: \pi^{-1}(U_\alpha) \rightarrow U_\alpha \times F, [(\alpha, b, f)] \mapsto (b, f)$$

による**局所自明性**を持つ. 従って組 $\xi := (E, \pi, B, F)$ は構造群 G , 局所自明化 $\{\varphi_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$, 変換関数 $\{t_{\alpha\beta}\}_{\alpha, \beta \in \Lambda}$ を持つ**ファイバー束**になり, 証明が終わる. ■

^{*22} \mathcal{E} はいわば, 「貼り合わせる前の互いにバラバラな素材 (局所自明束 $U_\alpha \times F$)」である. 証明の以降の部分では, これらの「素材」を $U_\alpha \cap U_\beta \neq \emptyset$ の部分に関して「良い性質 (2.4.3) を持った接着剤 $\{t_{\alpha\beta}\}$ 」を用いて「貼り合わせる」操作を, 位相を気にしながら行う.

^{*23} 逆写像は $\varphi_\alpha^{-1}: U_\alpha \times F \rightarrow \pi^{-1}(U_\alpha), (b, f) \mapsto [(\alpha, b, f)]$ である. φ_α も φ_α^{-1} も C^∞ 写像の合成で書けるので C^∞ 写像である.

定義 2.6: 主束

構造群を G に持つ **ファイバー束** $\xi = (P, \pi, M, G)$ が**主束** (principal bundle) であるとは, G の G 自身への左作用が自然な**左作用**^aであることを言う.

^a つまり, $g \triangleright x := gx$ (Lie 群の積) である.

次の命題は証明の構成が極めて重要である:

命題 2.2: 主束の全空間への右作用

$\xi = (P, \pi, M, G)$ を**主束**とする. このとき, G の全空間 P への**自由な右作用**が自然に定義され, その軌道空間 (orbit space) P/G が M になる.

証明 ξ の**局所自明化**を $\{\varphi_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$, 変換関数を $\{t_{\alpha\beta}: U_\alpha \cap U_\beta \rightarrow G\}_{\alpha, \beta \in \Lambda}$ と書く. $\forall u \in P, \forall g \in G$ をとる. $\pi(u) \in U_\alpha$ となる $\alpha \in \Lambda$ を選び, 対応する**局所自明化** φ_α による u の像を $\varphi_\alpha(u) =: (p, h) \in U_\alpha \times G$ とおく^{*24}. このとき G の P への右作用 $\blacktriangleleft: P \times G \rightarrow P$ を次のように定義する^{*25}:

$$u \blacktriangleleft g := \varphi_\alpha^{-1}(p, hg) \quad (2.4.4)$$

\blacktriangleleft の well-definedness

$\beta \neq \alpha$ に対しても $\pi(u) \in U_\beta$ であるとする. このとき $\varphi_\beta(u) = (p, h') \in (U_\alpha \cap U_\beta) \times G$ と書いて, また変換関数の定義から

$$h' = t_{\alpha\beta}(p)h \quad (t_{\alpha\beta}(p) \in G)$$

である. したがって

$$\varphi_\beta^{-1}(p, h'g) = \varphi_\beta^{-1}(p, (t_{\alpha\beta}(p)h)g) = \varphi_\beta^{-1}(p, t_{\alpha\beta}(p)hg) = \varphi_\beta^{-1} \circ (\varphi_\beta \circ \varphi_\alpha^{-1})(p, hg) = \varphi_\alpha^{-1}(p, hg)$$

が分かり, 式 (2.4.4) の右辺は局所自明化の取り方によらない.

\blacktriangleleft は右作用 写像 $\rho: G^{\text{op}} \rightarrow \text{Diff } P, g \mapsto (u \mapsto u \blacktriangleleft g)$ が群準同型であることを示す.

- (1) $u \blacktriangleleft 1_G = \varphi_\alpha^{-1}(p, h1_G) = \varphi_\alpha^{-1}(p, h) = u$
- (2) $\forall g_1, g_2 \in G$ をとる.

$$u \blacktriangleleft (g_1g_2) = \varphi_\alpha^{-1}(p, (hg_1)g_2) = \varphi_\alpha^{-1}(p, hg_1) \blacktriangleleft g_2 = (u \blacktriangleleft g_1) \blacktriangleleft g_2$$

\blacktriangleleft は自由

$\forall \alpha \in \Lambda$ に対して $\forall u = (p, g) \in \pi^{-1}(U_\alpha)$ をとる. $u \blacktriangleleft g' = u$ ならば

$$u \blacktriangleleft g' = \varphi_\alpha^{-1}(p, gg') = u = \varphi_\alpha^{-1}(p, g1_G)$$

が成り立つが, 局所自明化は全単射なので $gg' = g$ が言える. g は任意なので $g' = 1_G$ が分かった.

^{*24} つまり, $p := \pi(u), h := \text{proj}_2 \circ \varphi_\alpha(u)$ と言うことである.

^{*25} 右辺の hg は Lie 群の乗法である.

軌道空間が M

$\forall \alpha \in \Lambda$ に対して, G の右作用 (2.4.4) による $U \times G$ の軌道空間は $(U \times G)/G = U \times \{1_G\} = U$ となる. 故に P 全域に対しては $P/G = B$ となる.

■

定理 2.1:

コンパクト Hausdorff 空間 P と, P に自由に作用しているコンパクト Lie 群 G を与える. この時, 軌道空間への商写像

$$\pi: P \longrightarrow P/G$$

は主束である.

証明

■

構造群を G とするファイバー束 $F \hookrightarrow E \xrightarrow{\pi} M$ が与えられたとき, 命題 2.1 を使うと, 変換関数が共通の主束 $G \hookrightarrow P \xrightarrow{p} M$ が存在することがわかる. このようにして得られる主束をファイバー束 $F \hookrightarrow E \xrightarrow{\pi} M$ に同伴する (associated) 主束と呼ぶ.

【例 2.4.2】 フレーム束

$\mathbb{K}^n \hookrightarrow E \xrightarrow{\pi} M$ を, 変換関数 $\{t_{\alpha\beta}: M \longrightarrow \mathrm{GL}(n, \mathbb{K})\}$ を持つ階数 n のベクトル束とする. $\forall x \in M$ に対して

$$P_x := \{ f \in \mathrm{Hom}(\mathbb{K}^n, E_x) \mid \text{同型写像} \}$$

とし,

$$P := \coprod_{x \in M} P_x, \quad \pi: P \longrightarrow M, (x, f) \longmapsto x$$

と定める. $\mathrm{GL}(n, \mathbb{K}) \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ に適切な局所自明化を入れて, 変換関数が $\{t_{\alpha\beta}: M \longrightarrow \mathrm{GL}(n, \mathbb{K})\}$ になるような主束を構成してみよう.

\mathbb{K}^n の標準基底を e_1, \dots, e_n とすると, $\forall f \in P_x$ に対して f は E_x の基底 $f(e_1), \dots, f(e_n)$ と同一視される. 実際, $\forall v = v^\mu e_\mu \in \mathbb{K}^n$ に対して

$$f(v) = v^\mu f(e_\mu)$$

である. よって $f_\mu := f(e_\mu)$ において $f = (f_1, \dots, f_n) \in P_x$ と表すことにする.

E の局所自明化 $\{\varphi_\alpha: \pi^{-1}(U_\alpha) \longrightarrow U_\alpha \times \mathbb{K}^n\}$ を与える. このとき, n 個の U_α 上の局所切断 $s_1, \dots, s_n \in \Gamma(E|_{U_\alpha})$ を

$$s_\mu(x) = \varphi_\alpha^{-1}(x, e_\mu)$$

と定義すると, $\forall x \in U_\alpha$ に対して $s_1(x), \dots, s_n(x)$ が E_x の基底となる^a. 故に, n 個の P の局所切断 $p_\alpha \in \Gamma(P|_{U_\alpha})$ を

$$p_\alpha(x) := (s_1(x), \dots, s_n(x)) \in P_x$$

により定義できる. このとき, $\forall (x, f) = (x, (f_1, \dots, f_n)) \in \pi^{-1}(U_\alpha)$ に対してある $g \in \text{GL}(n, \mathbb{K})$ が存在して $f = p_\alpha(x)g$ と書ける. ただし g は基底の取り替え行列で, ただ単に右から行列の積として右から作用している. 故に P の局所自明化を

$$\psi_\alpha: \pi^{-1}(U_\alpha) \longrightarrow U_\alpha \times \text{GL}(n, \mathbb{K}), (x, f) = (x, p_\alpha(x)g) \longmapsto (x, g)$$

と定義できる. 変換関数を計算すると

$$\begin{aligned} \psi_\beta^{-1}(x, g) &= (x, p_\beta(x)g) \\ &= \left(x, (\varphi_\beta^{-1}(x, e_1), \dots, \varphi_\beta^{-1}(x, e_n))g \right) \\ &= \left(x, \left(\varphi_\alpha^{-1}(x, t_{\alpha\beta}(x)e_1), \dots, \varphi_\beta^{-1}(x, t_{\alpha\beta}(x)e_n) \right)g \right) \\ &= (x, p_\alpha(x)t_{\alpha\beta}(x)g) \\ &= \psi_\alpha^{-1}(x, t_{\alpha\beta}(x)g) \end{aligned}$$

となり, 目標が達成された. この $\text{GL}(n, \mathbb{K}) \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ のことを**フレーム束**と呼ぶ.

^a このような切断の組のことを**フレーム場**と呼ぶ.

命題 2.3: Borel 構成

$G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ を**主束**とし, Lie 群 G の C^∞ 多様体への**左作用** $\blacktriangleright: G \times F \longrightarrow F$ を与える. (2.4.4) で定義された G の P への右作用を $\blacktriangleleft: P \times G \longrightarrow P$ と書く.

- 積多様体 $P \times F$ への G の新しい右作用 $\blacktriangleleft: (P \times F) \times G \longrightarrow P \times F$ を

$$(u, f) \blacktriangleleft g := (u \blacktriangleleft g, g^{-1} \blacktriangleright f)$$

と定義し, この右作用による $P \times F$ の軌道空間を $P \times_G F := (P \times F)/G$ と書く.

- 商写像 $\varpi: P \times F \longrightarrow P \times_G F$, $(u, f) \longmapsto (u, f) \blacktriangleleft G$ による $(u, f) \in P \times F$ の像を $u \times_G f \in P \times_G F$ と書く. このとき写像

$$q: P \times_G F \longrightarrow M, u \times_G f \longmapsto \pi(u)$$

が well-defined になる.

このとき, $F \hookrightarrow P \times_G F \xrightarrow{q} M$ は構造群 G をもち, 変換関数が $G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ のそれと同じであるような**ファイバー束**である.

逆に, 与えられた主束を素材にして, 変換関数を共有するファイバー束を構成することができる.

証明 q の well-definedness は, (2.4.4) で定義した右作用 \blacktriangleleft が $\pi(u)$ を不変に保つので明らか.

主束 $G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ の開被覆, 局所自明化, 変換関数をそれぞれ $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$, $\{\varphi_\lambda: \pi^{-1}(U_\lambda) \longrightarrow U_\lambda \times G\}_{\lambda \in \Lambda}$, $\{t_{\alpha\beta}: M \longrightarrow G\}_{\alpha, \beta \in \Lambda}$ と書く. また, $\forall \lambda \in \Lambda$ に対して**局所切断** $s_\lambda \in \Gamma(P|_{U_\lambda})$ を

$$s_\lambda: M \longrightarrow \pi^{-1}(U_\lambda), x \longmapsto \varphi_\lambda^{-1}(x, 1_G)$$

と定義する.

このとき, $\forall \lambda \in \Lambda$ に対して C^∞ 写像

$$\psi_\lambda: q^{-1}(U_\lambda) \longrightarrow U_\lambda \times F, s_\lambda(x) \times_G f \longmapsto (x, f) \quad (2.4.5)$$

が well-defined な^{*26} 微分同相写像になる^{*27} ので, 族

$$\{\psi_\lambda: q^{-1}(U_\lambda) \longrightarrow U_\lambda \times F\}_{\lambda \in \Lambda}$$

を $F \hookrightarrow P \times_G F \xrightarrow{q} M$ の局所自明化にとる. すると $\forall \alpha, \beta \in \Lambda, \forall (x, f) \in (U_\alpha \cap U_\beta) \times F$ に対して

$$\begin{aligned} \psi_\beta^{-1}(x, f) &= s_\beta(x) \times_G f \\ &= \varphi_\beta^{-1}(x, 1_G) \times_G f \\ &= \varphi_\alpha^{-1}(x, t_{\alpha\beta}(x) 1_G) \times_G f \\ &= \varphi_\alpha^{-1}(x, 1_G t_{\alpha\beta}(x)) \times_G f \\ &= (\varphi_\alpha^{-1}(x, 1_G) \blacktriangleleft t_{\alpha\beta}(x)) \times_G f \\ &= (s_\alpha(x) \blacktriangleleft t_{\alpha\beta}(x)) \times_G f \\ &= \left((s_\alpha(x) \blacktriangleleft t_{\alpha\beta}(x)) \blacktriangleleft t_{\alpha\beta}(x)^{-1} \right) \times_G (t_{\alpha\beta}(x) \blacktriangleright f) \\ &= s_\alpha(x) \times_G (t_{\alpha\beta}(x) \blacktriangleright f) \\ &= \psi_\alpha^{-1}(x, t_{\alpha\beta}(x) \blacktriangleright f) \end{aligned}$$

が成り立つので $F \hookrightarrow P \times_G F \xrightarrow{q} M$ の変換関数は

$$\{t_{\alpha\beta}: M \longrightarrow G\}_{\alpha, \beta \in \Lambda}$$

である. ■

【例 2.4.3】 同伴ベクトル束

主束 $G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ を任意に与える. Lie 群 G の, N 次元 \mathbb{K} ベクトル空間 V への**左作用**とは, Lie 群 G の表現 $\rho: G \longrightarrow \mathrm{GL}(V)$ のことに他ならない^a. このとき, 命題 2.3 の方法によって構成される階数 N の**ベクトル束**のことを $P \times_\rho V$ と書き, **同伴ベクトル束** (associated vector bundle) と呼ぶ.

^a $\mathrm{End} V$ に標準的な C^∞ 構造を入れて Lie 群と見做したものを $\mathrm{GL}(V)$ と書いた.

^{*26} $\forall u \times_G f \in q^{-1}(U_\lambda)$ とする. このとき $q(u \times_G f) = \pi(u) \in U_\lambda$ なので $u \in P$ に主束 $G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ の局所自明化 $\varphi_\lambda: \pi^{-1}(U_\lambda) \longrightarrow U_\lambda \times F$ を作用させることができる. 従って $g(u) := \mathrm{proj}_2 \circ \varphi_\lambda(u) \in G$ とおけば, G の P への右作用の定義 (2.4.4) から $u = \varphi_\lambda^{-1}(\pi(u), g(u)) = \varphi_\lambda^{-1}(\pi(u), 1_G) \blacktriangleleft g(u) = s_\lambda(\pi(u)) \blacktriangleleft g(u)$ が成り立ち, $u \times_G f = (s_\lambda(\pi(u)) \blacktriangleleft g(u)) \times_G f = s_\lambda(\pi(u)) \times_G (g(u) \blacktriangleright f)$ と書くことができる. よって ψ_λ の定義 (2.4.5) において $\psi_\lambda(u \times_G f) = (\pi(u), g(u) \blacktriangleright f)$ であり, 全ての $q^{-1}(U_\lambda)$ の行き先が定義されていることがわかった. 次に $u \times_G f = u' \times_G f' \in q^{-1}(U_\lambda)$ であるとする. このとき右作用 \blacktriangleleft の定義からある $h \in G$ が存在して $u' = \varphi_\lambda^{-1}(\pi(u'), g(u')) = u \blacktriangleleft h = \varphi_\lambda^{-1}(\pi(u), g(u)h)$, $f' = h^{-1} \blacktriangleright f$ が成り立つので, $\pi(u') = \pi(u)$, $g(u') = g(u)h$, $f' = h^{-1} \blacktriangleright f$ が言える. 従って $\psi_\lambda(u' \times_G f') = (\pi(u'), g(u') \blacktriangleright f') = (\pi(u), (g(u)h) \blacktriangleright (h^{-1} \blacktriangleright f)) = (\pi(u), g(u) \blacktriangleright h \blacktriangleright h^{-1} \blacktriangleright f) = (\pi(u), g(u) \blacktriangleright f) = \psi_\lambda(u \times_G f)$ が成り立ち, ψ_λ が well-defined であることが示された.

^{*27} $\pi: P \longrightarrow M, g := \mathrm{proj}_2 \circ \varphi_\lambda: q^{-1}(U_\lambda) \longrightarrow G, \blacktriangleright: G \times F \longrightarrow F$ は全て C^∞ 写像の合成の形をしているので C^∞ 写像であり, $\psi_\lambda := (\pi \times (\blacktriangleright \circ (g \times \mathrm{id}_F)))$ もこれらの合成として書けている (写像 \times, id_F はもちろん C^∞ 級である) ので C^∞ 写像である. well-definedness の証明と同じ議論で ψ_λ の単射性がわかる. 全射性は定義 (2.4.5) より明らか. 逆写像 $(x, f) \longmapsto s_\lambda(x) \times_G f$ も, C^∞ 写像たちの合成 $q \circ (s_\lambda \times \mathrm{id}_F)$ なので C^∞ 写像である.

これでゲージ場を導入する準備が整った。つまり、この節の冒頭で考えた内部対称性を持つ場 $\varphi: \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{K}^N$ とは、厳密には主束

$$G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} \mathcal{M}$$

の、線型 Lie 群 G の N 次元表現

$$\rho: G \rightarrow \mathrm{GL}(\mathbb{K}^N), U \mapsto (v \mapsto Uv)$$

による同伴ベクトル束

$$\mathbb{K}^N \hookrightarrow P \times_{\rho} \mathbb{K}^N \xrightarrow{q} \mathcal{M}$$

の局所切断 $\phi: V_{\alpha} \rightarrow P \times_{\rho} \mathbb{K}^N$ を、ある一つの局所自明化 $\sigma_{\alpha}: q^{-1}(V_{\alpha}) \rightarrow V_{\alpha} \times \mathbb{K}^N$ によって座標表示したもの（の第 2 成分を取り出してきたもの）

$$\varphi = \mathrm{proj}_2 \circ \sigma_{\alpha} \circ \phi: V_{\alpha} \rightarrow \mathbb{K}^N$$

のことだと見做せる。と言うのも、こう考えることで場の変換性 (2.4.2)

$$\varphi(x) \rightarrow \tilde{\varphi}(x) := U(x)\varphi(x)$$

が、時空 \mathcal{M} の 2 つのチャート $(V, (x^{\mu}))$, $(\tilde{V}, (\tilde{x}^{\mu}))$ の共通部分 $V \cap \tilde{V}$ 上における、局所自明化 $\sigma, \tilde{\sigma}: q^{-1}(V \cap \tilde{V}) \rightarrow (V \cap \tilde{V}) \times \mathbb{K}^N$ の取り替え（内部自由度に関する一般座標変換のようなもの）に伴う変換関数 $U_{\tilde{V}, V}: \mathcal{M} \rightarrow G$ の作用

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma} \circ \sigma^{-1}: (V \cap \tilde{V}) \times \mathbb{K}^N &\rightarrow (V \cap \tilde{V}) \times \mathbb{K}^N, \\ (x, \varphi(x)) &\mapsto \left(x, \rho(U_{\tilde{V}, V}(x))(\varphi(x)) \right) = \left(x, U_{\tilde{V}, V}(x)\varphi(x) \right) \end{aligned}$$

として上手く定式化できているのである*28。

2.4.2 Lie 群の指数写像

主束の接続の話に入る前に、Lie 群の Lie 代数について考察する。この小節は [?, Chapter 20], [?, 第 6 章] による。

Lie 群 G の上の微分同相写像*29

$$\begin{aligned} L_g: G &\rightarrow G, x \mapsto gx, \\ R_g: G &\rightarrow G, x \mapsto xg, \end{aligned}$$

のことをそれぞれ左移動、右移動と言う。

*28 変換性によって場を定義していたので、数学的定式化はこれで良い。なお、この定式化は主束の全空間 P の情報を一切使っていないが、これは命題 2.1 の表れである。実際、この節の冒頭の議論で顕に登場したのは時空 \mathcal{M} 、場の配位を記述する空間 \mathbb{K}^N 、内部対称性を表す Lie 群 G とその表現 $\rho: G \rightarrow \mathrm{GL}(N, \mathbb{K})$ 、場の局所変換を表す C^{∞} 写像 $U: \mathcal{M} \rightarrow G$ だけだったので、その数学的定式化が P によらないのは妥当だと思う。

*29 従って、命題??から L_g, R_g によるベクトル場の押し出しが一意的に存在する。

定義 2.7: 左不変ベクトル場

Lie 群 G の左不変ベクトル場 (left-invariant vector field) とは, \mathbb{R} -ベクトル空間

$$\mathfrak{X}^L(G) := \{ X \in \mathfrak{X}(G) \mid \forall g \in G, (L_g)_* X = X \}$$

の元のこと. i.e. $\forall g \in G$ に対して自分自身と L_g -related な C^∞ ベクトル場のことを言う.

$\forall g \in G$ と $\forall X, Y \in \mathfrak{X}^L(G)$ をとる. このとき $(L_g)_* X = X$, $(L_g)_* Y = Y$ なので, 命題??の後半から

$$(L_g)_*[X, Y] = [(L_g)_* X, (L_g)_* Y] = [X, Y]$$

が言える. i.e. $\mathfrak{X}^L(G)$ は Lie ブラケットについて閉じるので, 体 \mathbb{R} 上の Lie 代数になる.

命題 2.4:

G を Lie 群とする. このとき評価写像

$$\text{ev}_{1_G}: \mathfrak{X}^L(M) \longrightarrow T_{1_G}G, X \longmapsto X_{1_G}$$

はベクトル空間の同型写像である.

証明 ev_{1_G} が \mathbb{R} -線型写像であることは明らか.

ev_{1_G} が単射

$\text{Ker ev}_{1_G} = \{0\}$ を示す. $\forall X \in \text{Ker ev}_{1_G}$ に対して $\text{ev}_{1_G}(X) = X_{1_G} = 0$ が成り立つ. 一方 $X \in \mathfrak{X}^L(G)$ でもあるので, $\forall g \in G$ に対して $X_g = X_{L_g(1_G)} = (T_{1_G}L_g)(X_{1_G}) = 0$ が言える^{*30}.

ev_{1_G} が全射

$\forall v \in T_{1_G}G$ を 1 つとり, C^∞ ベクトル場 $v^L \in \mathfrak{X}(G)$ を

$$v^L: G \longrightarrow TG, g \longmapsto T_{1_G}(L_g)(v) \quad (2.4.6)$$

と定義する^{*31}. $\forall g \in G$ に対して v^L が自分自身と L_g -related であることを示す. 実際, $\forall h \in G$ に対して

$$T_h(L_g)(v^L|_h) = T_h(L_g) \circ T_{1_G}(L_h)(v) = T_{1_G}(L_g \circ L_h)(v) = T_{1_G}(L_{gh})(v) = v^L|_{gh} = v^L|_{L_g(h)}$$

が言える. i.e. $v^L \in \mathfrak{X}^L(G)$ である. 従って v^L に ev_{1_G} を作用させることができ, $\text{ev}_{1_G}(v^L) = v^L|_{1_G} = T_{1_G}L_{1_G}(v) = v \in \text{Im ev}_{1_G}$ が言えた. ■

ここで $\mathfrak{g} := T_{1_G}G$ とおき, 命題 2.4 の (2.4.6) を使って \mathfrak{g} 上の Lie ブラケットを

$$[X, Y] := [X^L, Y^L]_{1_G} \in \mathfrak{g}$$

^{*30} 2 つ目の等号で L_g -related の定義を使った.

^{*31} v^L が C^∞ であることは次のようにしてわかる: $\forall f \in C^\infty(G)$ をとる. $\gamma(0) = 1_G$, $\dot{\gamma}(0) = v$ を充たす C^∞ 曲線 $\gamma: (-\delta, \delta) \longrightarrow G$ をとると, $\forall g \in G$ に対して $(v^L f)(g) = v(f \circ L_g) = \dot{\gamma}(0)(f \circ L_g) = \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} (f \circ L_g \circ \gamma)(t)$ と書ける. $f \circ L_g \circ \gamma: (-\delta, \delta) \times G \longrightarrow \mathbb{R}$ と見做すとこれは C^∞ 写像の合成なので C^∞ 写像であり, 右辺は g に関して C^∞ 級である.

と定義すれば ev_{1_G} は Lie 代数の同型となる．この意味で \mathfrak{g} のことを **Lie 群 G の Lie 代数**と呼ぶ．

定理 2.2: 誘導される Lie 代数の準同型

Lie 群 G, H と Lie 群の準同型 $F: G \rightarrow H$ を与える．

- (1) このとき, $\forall X \in \mathfrak{g}$ に対して $Y \in \mathfrak{h}$ がただ一つ存在して, X^L と Y^L が F -related になる． i.e. $Y^L = F_* X^L$ である．
- (2) $T_{1_G} F: \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{h}$, $X \mapsto T_{1_G} F(X)$ は Lie 代数の準同型である．

証明 (1) $Y = T_{1_G} F(X) \in \mathfrak{h}$ に対して X^L と Y^L が F -related であることを示す．実際, F が Lie 群の準同型であることから $\forall g, h \in G$ について

$$F \circ L_g(h) = F(gh) = F(g)F(h) = L_{F(g)} \circ F(h)$$

が成り立つこと, i.e. $F \circ L_g = L_{F(g)} \circ F$ に注意すると $\forall g \in G$ に対して

$$\begin{aligned} T_g F(X^L|_g) &= T_g F(T_{1_G} L_g(X)) \\ &= T_{1_G} (F \circ L_g)(X) \\ &= T_{1_G} (L_{F(g)} \circ F)(X) \\ &= T_{1_H} (L_{F(g)}) \circ T_{1_G} F(X) \\ &= T_{1_H} (L_{F(g)})(Y) \\ &= Y_{F(g)} \end{aligned}$$

が言える．系??より $F_* X^L = Y^L$ がわかるので Y は一意的に定まる．

- (2) $\forall X, Y \in \mathfrak{g}$ をとる．(1) と命題??-(1) より $[F_* X^L, F_* Y^L]$ は $[X^L, Y^L]$ と F -related であるが, (1) で示した一意性から

$$F_* [X^L, Y^L] = [F_* X^L, F_* Y^L]$$

が言える．両辺の $1_H \in H$ における値をとることで

$$T_{1_G} F([X, Y]) = (F_* [X^L, Y^L])_{1_G} = ([F_* X^L, F_* Y^L])_{1_G} = [X, Y]$$

が示された．

■

定義 2.8: 1 パラメータ部分群

Lie 群の準同型写像 $\mathbb{R} \rightarrow G$ のことを Lie 群 G の **1 パラメータ部分群** (one-parameter subgroup) と呼ぶ^a．

^a 1 パラメータ部分群自身は部分 Lie 群ではない．

命題 2.5: 1 パラメータ部分群の特徴付け

Lie 群 G を与える.

- (1) G の任意の 1 パラメータ部分群 $\gamma: \mathbb{R} \rightarrow G$ に対して, γ を初期条件 $\gamma(0) = 1_G$ を満たす極大積分曲線として持つ左不変ベクトル場 $X \in \mathfrak{X}^L(G)$ が一意に存在する.
- (2) $\forall X \in \mathfrak{X}^L(G)$ に対して, 初期条件 $\gamma(0) = 1_G$ を満たす唯一の X の極大積分曲線 $\gamma: \mathbb{R} \rightarrow G$ は G の 1 パラメータ部分群である.

上述の対応によって $X \in \mathfrak{X}^L(G)$ から一意に定まる 1 パラメータ部分群のことを X が生成する 1 パラメータ部分群と呼ぶ.

命題 2.4 の同型と併せると

$$\{ G \text{ の 1 パラメータ部分群} \} \xleftrightarrow{*} \mathfrak{X}^L(G) \xleftrightarrow{\text{ev}_{1_G}} T_{1_G}G$$

の 1 対 1 対応がある. i.e. G の任意の 1 パラメータ部分群 γ は, その初速度 $\dot{\gamma}(0) \in T_{1_G}G$ により完全に決定される.

証明 (1) G の 1 パラメータ部分群 $\gamma: \mathbb{R} \rightarrow G$ を与える. $\frac{d}{dt} \in \mathfrak{X}^L(\mathbb{R})$ なので, 命題 2.2 より, $X := \gamma_*\left(\frac{d}{dt}\right) \in \mathfrak{X}^L(G)$ は $\frac{d}{dt}$ と γ -related な唯一の左不変ベクトル場である. このとき $\forall t_0 \in \mathbb{R}$ に大して

$$X_{\gamma(t_0)} = T_{t_0}\gamma \left(\frac{d}{dt} \Big|_{t=t_0} \right) = \dot{\gamma}(t_0)$$

が成り立ち, γ は初期条件 $\gamma(0) = 1_G$ を満たす X の極大積分曲線である.

- (2) 定理??より $\forall X \in \mathfrak{X}^L(G)$ は完備なので, X は大域的なフローを生成する. 従って $\gamma(0) = 1_G$ を満たす X の極大積分曲線 γ が唯一存在し, その定義域が \mathbb{R} になる.

$\forall g \in G$ をとる. 左不変ベクトル場の定義より $X \in \mathfrak{X}^L(G)$ は X 自身と L_g -related なので, 命題??から $L_g \circ \gamma: \mathbb{R} \rightarrow G$ もまた X の積分曲線である. 従って $\forall s \in \mathbb{R}$ に大して曲線 $L_{\gamma(s)} \circ \gamma: t \mapsto L_{\gamma(s)}(\gamma(t)) = \gamma(s)\gamma(t)$ は $t=0$ において点 $\gamma(s) \in G$ を通過する X の積分曲線である. 然るに補題??-(2) より曲線 $t: t \mapsto \gamma(s+t)$ もまた同一の初期条件を満たす X の積分曲線なので, 定理??よりこれらは $\forall t \in \mathbb{R}$ において一致しなくてはならない:

$$\gamma(s)\gamma(t) = \gamma(s+t)$$

i.e. $\gamma: \mathbb{R} \rightarrow G$ は 1 パラメータ部分群である. ■

定義 2.9: 指数写像

Lie 群 G を与える. \mathfrak{g} を G の Lie 代数とする. G の指数写像 (exponential map) を

$$\exp: \mathfrak{g} \rightarrow G, X \mapsto \gamma_{(X)}(1)$$

と定義する. ただし, $\gamma_{(X)}: \mathbb{R} \rightarrow G$ は $X^L \in \mathfrak{X}^L(G)$ が生成する 1 パラメータ部分群である.

命題 2.6: 指数写像の性質

Lie 群 G を与える. \mathfrak{g} を G の Lie 代数とする.

- (1) $\exp: \mathfrak{g} \rightarrow G$ は C^∞ 写像
- (2) $\forall X \in \mathfrak{g}$ に対して,

$$\gamma_{(X)}: \mathbb{R} \rightarrow G, t \mapsto \exp(tX)$$

は $X^L \in \mathfrak{X}^L(G)$ が生成する 1 パラメータ部分群である.

- (3) $\forall X \in \mathfrak{g}, \forall s, t \in \mathbb{R}$ に対して

$$\exp((s+t)X) = \exp(sX) \exp(tX)$$

- (4) $\forall X \in \mathfrak{g}$ に対して

$$(\exp X)^{-1} = \exp(-X)$$

- (5) H を別の Lie 群, $F: G \rightarrow H$ を任意の Lie 群の準同型とすると, 以下の図式が可換になる:

$$\begin{array}{ccc} \mathfrak{g} & \xrightarrow{T_1 G F} & \mathfrak{h} \\ \exp \downarrow & & \downarrow \exp \\ G & \xrightarrow{F} & H \end{array}$$

- (6) $\forall X \in \mathfrak{g}$ に対して, 左不変ベクトル場 $X^L \in \mathfrak{X}^L(G)$ が生成するフロー $\theta_{(X)}: \mathbb{R} \times G \rightarrow G$ に対して

$$\theta_{(X)}(t, g) = g \exp(tX) (= R_{\exp(tX)}(g))$$

が成り立つ.

証明 (1) [?, p.519, Proposition 20.8-(1)]

- (2) $\gamma: \mathbb{R} \rightarrow G$ を $X^L \in \mathfrak{X}^L(G)$ が生成する 1 パラメータ部分群とする. これは命題 2.5-(2) により $\gamma(0) = 1_G$ を充たす X^L の唯一の極大積分曲線である.

$\forall t \in \mathbb{R}$ をとる. このとき補題??-(1) より, C^∞ 曲線 $\tilde{\gamma}: \mathbb{R} \rightarrow G, s \mapsto \gamma(ts)$ は初期条件 $\tilde{\gamma}(0) = 1_G$ を充たすベクトル場 tX^L の極大積分曲線なので, その一意性から

$$\gamma_{(X)}(t) = \exp(tX) = \tilde{\gamma}(1) = \gamma(t)$$

が成り立つ. i.e. $\gamma_{(X)} = \gamma$ が言えた.

- (3) (2) より $\gamma_{(X)}$ が 1 パラメータ部分群なので

$$\exp((s+t)X) = \gamma_{(X)}(s+t) = \gamma_{(X)}(s)\gamma_{(X)}(t) = \exp(sX)\exp(tX)$$

- (4) (2) より $\gamma_{(X)}$ が 1 パラメータ部分群なので

$$\begin{aligned} \exp X \exp(-X) &= \gamma_{(X)}(1)\gamma_{(X)}(-1) = \gamma_{(X)}(0) = 1_G \\ \exp(-X) \exp X &= \gamma_{(X)}(-1)\gamma_{(X)}(1) = \gamma_{(X)}(0) = 1_G \end{aligned}$$

が言える. i.e. $(\exp X)^{-1} = \exp(-X)$ である.

- (5) $\forall X \in \mathfrak{g}$ を 1 つ固定する. (2) より C^∞ 写像 $t \mapsto \exp(t T_{1_G} F(X))$ は左不変ベクトル場 $(T_{1_G} F(X))^L = F_*(X^L) \in \mathfrak{X}^L(G)$ が生成する 1 パラメータ部分群である. ここで, $\sigma: \mathbb{R} \rightarrow H, t \mapsto F(\exp(tX))$ とおいたとき

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}(0) &= T_0(F \circ \exp(tX)) \left(\frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \right) \\ &= T_{1_G} F \circ T_0(\exp(tX)) \left(\frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \right) \\ &= T_{1_G} F(\gamma_{(X)}(0)) \\ &= T_{1_G} F(X) \end{aligned}$$

が成り立つので σ もまた左不変ベクトル場 $(T_{1_G} F(X))^L \in \mathfrak{X}^L(G)$ が生成する 1 パラメータ部分群であり, その一意性から $\sigma(t) = \exp(t T_{1_G} F(X))$ が言える.

- (6) $\forall (t, g) \in \mathbb{R} \times G$ をとる. **左不変ベクトル場の定義**より $X^L \in \mathfrak{X}^L(G)$ は X^L 自身と L_g -related なので, 命題??から $L_g \circ \gamma_{(X)}: \mathbb{R} \rightarrow G, t \mapsto \exp(tX)$ もまた X^L の極大積分曲線である. $L_g \circ \gamma_{(X)}(0) = g$ なので, 極大積分曲線の一意性から $L_g \circ \gamma_{(X)} = \theta_{(X)}^{(g)}$ が言える. 従って

$$g \exp(tX) = L_g(\exp(tX)) = L_g \circ \gamma_{(X)}(t) = \theta_{(X)}^{(g)}(t) = \theta_{(X)}(t, g).$$

■

定義 2.10: 微分表現

V を \mathbb{K} -ベクトル空間とする. Lie 群 G の表現 $\rho: G \rightarrow \mathrm{GL}(V)$ の, $1_G \in G$ における微分 $T_{1_G} \rho: \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{gl}(V)$ は Lie 代数の表現である. この $T_{1_G} \rho$ のことを ρ の**微分表現** (differential representation) と呼ぶ.

【例 2.4.4】 随伴表現

$\forall g \in G$ に対して準同型 $F_g: G \rightarrow G, x \mapsto gxg^{-1}$ を考えると $F_{gh} = F_g \circ F_h$ が成り立つ. 故に, $1_G \in G$ における微分

$$T_{1_G}(F_g): \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$$

は, T_{1_G} の関手性から $T_{1_G}(F_{gh}) = T_{1_G}(F_g) \circ T_{1_G}(F_h)$ を満たす. よって

$$\mathrm{Ad}: G \rightarrow \mathrm{GL}(\mathfrak{g}), g \mapsto T_{1_G}(F_g)$$

は Lie 群 G の表現となる^a. これを Lie 群 G の**随伴表現** (adjoint representation) と呼ぶ.

Ad の微分表現を**指数写像**を使って計算してみよう. $\forall X \in \mathfrak{g}$ をとる. 命題 2.6-(2) により曲線 $\gamma_{(X)}: t \mapsto \exp(tX)$ は X が生成する 1 パラメータ部分群なので, 命題??から $\gamma_{(X)}(0) = X$ である.

従って $\forall Y \in \mathfrak{g}$ に大して

$$\begin{aligned}
(T_{1_G}(\text{Ad})(X))Y &= \left(T_{1_G}(\text{Ad})(\gamma(\dot{X})(0)) \right) Y \\
&= T_{1_G}(\text{Ad}) \circ T_0 \gamma(X) \left(\frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \right) Y \\
&= T_0(\text{Ad} \circ \gamma(X)) \left(\frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \right) Y \\
&= \left(\frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \text{Ad}(\exp(tX)) \right) Y \\
&= \left(\frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \text{Ad}(\exp(tX))(Y) \right) \\
&= \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \left(T_{1_G}(F_{\exp(tX)})(Y) \right) \\
&= \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \left(T_{1_G}(R_{(\exp(tX))^{-1}} \circ L_{\exp(tX)})(Y_{1_G}^L) \right) \\
&= \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \left(T_{L_{\exp(tX)}(1_G)}(R_{\exp(-tX)}) \circ T_{1_G}(L_{\exp(tX)})(Y_{1_G}^L) \right) \\
&= \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \left(T_{\exp(tX)}(R_{\exp(-tX)})(Y_{\exp(tX)}^L) \right)
\end{aligned}$$

ここで、命題 2.6-(6) より $X^L \in \mathfrak{X}^L(G)$ が生成するフローが $\theta_t(g) = R_{\exp(tX)}(g)$ と書かれることを思い出すと、

$$\begin{aligned}
&\frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \left(T_{\exp(tX)}(R_{\exp(-tX)})(Y_{\exp(tX)}^L) \right) \\
&= \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} T_{\theta_t(1_G)}(\theta_{-t})(Y_{\theta_t(1_G)}^L) \\
&= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{T_{\theta_t(1_G)}(\theta_{-t})(Y_{\theta_t(1_G)}^L) - Y_{1_G}^L}{t} \\
&= (\mathcal{L}_{X^L} Y^L)_{1_G} \\
&= [X^L, Y^L]_{1_G} \\
&= [X, Y]
\end{aligned}$$

となる。ただし 3 つ目の等号で Lie 微分の定義を使った。結局

$$\text{ad} := T_{1_G}(\text{Ad}): \mathfrak{g} \longrightarrow \mathfrak{gl}(\mathfrak{g}), X \longmapsto (Y \mapsto [X, Y])$$

であることが分かった。

^a 厳密には Ad の C^∞ 性を示さなくてはならない。証明は [?, p.534, Proposition 20.24] を参照。

定理??によって、 C^∞ 多様体 M 上の完備なベクトル場 X が Lie 群 \mathbb{R} の M への作用 $\theta: \mathbb{R} \times M \longrightarrow M$ を一意に定めることが分かる。そしてこのような状況を指して、ベクトル場 X は Lie 群 \mathbb{R} の作用 θ の無限小生成子であると言うのだった。この考えを任意の Lie 群 G の、任意の M への作用に拡張することができる。つまり、任意の Lie 群 G の任意の右作用 $\blacktriangleleft: M \times G \longrightarrow M$ は、ただ一つの無限小生成子を持つ。

定義 2.11: 基本ベクトル場

Lie 群 G が C^∞ 多様体 M に右から作用しているとする. この右作用を $\blacktriangleleft: M \times G \longrightarrow M$ と書く.

- $\forall X \in \mathfrak{g}$ に対して, 基本ベクトル場 (fundamental vector field) $X^\# \in \mathfrak{X}(M)$ を次のように定める:

$$X_x^\# := \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} (x \blacktriangleleft \exp(tX)) \in T_x M$$

- 写像

$$\blacktriangleleft^\# : \mathfrak{g} \longrightarrow \mathfrak{X}(M), X \longmapsto X^\#$$

のことを右作用 \blacktriangleleft の無限小生成子と呼ぶ.

上の状況下で

- $\forall g \in G$ に対して右作用移動 $R_g: M \longrightarrow M$ を $R_g(x) := x \blacktriangleleft g$ と定義する.
- $\forall x \in M$ に対して右作用軌道 $R^{(x)}: G \longrightarrow M$ を $R^{(x)}(g) := x \blacktriangleleft g$ と定義する.

$\forall X \in \mathfrak{g}$ に対して, C^∞ 写像^{*32}

$$\theta_{(X)}: \mathbb{R} \times M \longrightarrow M, (t, x) \longmapsto x \blacktriangleleft \exp(tX) = R_{\exp(tX)}(x)$$

は大域的フローである^{*33}. この大域的フローの無限小生成子はベクトル場

$$x \longmapsto \left(x, \dot{\theta}_{(X)}^{(x)}(0) \right) = \left(x, T_0(\theta_{(X)}^{(x)}) \left(\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} \right) \right)$$

であるが^{*34}, これがまさに $X^\# \in \mathfrak{X}(M)$ になっている. つまり, 基本ベクトル場は $\forall x \in M$ において, $\forall f \in C^\infty(M)$ に

$$X_x^\# f = T_0(\theta_{(X)}^{(x)}) \left(\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} \right) f = \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} (f \circ \theta_{(X)}^{(x)})(t) = \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} f(x \blacktriangleleft \exp(tX))$$

と作用する.

^{*32} これは命題 2.6-(6) からの類推だと言える.

^{*33} 実際, 命題 2.6 から

$$\begin{aligned} \theta_{(X)}(0, x) &= x \blacktriangleleft 1_G = x, \\ \theta_{(X)}(t+s, x) &= x \blacktriangleleft \exp((s+t)X) \\ &= x \blacktriangleleft (\exp(sX) \exp(tX)) \\ &= x \blacktriangleleft \exp(sX) \blacktriangleleft \exp(tX) \\ &= \theta_{(X)}(t, \theta_{(X)}(s, x)) \end{aligned}$$

が成り立つ.

^{*34} 強引に書くと $\theta_{(X)}^{(x)} = R^{(x)} \circ \exp(-X): \mathbb{R} \longrightarrow M$ ということになる.

もしくは、次のように考えることもできる：曲線 $\gamma_{(X)}: t \mapsto \exp(tX)$ は初速度 $\gamma_{(X)}'(0) = X$ なので、

$$\begin{aligned}
T_{1_G}(R^{(x)})(X) &= T_{1_G}(R^{(x)})(\gamma_{(X)}'(0)) \\
&= T_{1_G}(R^{(x)}) \circ T_0(\gamma_{(X)}) \left(\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} \right) \\
&= T_0(R^{(x)} \circ \gamma_{(X)}) \left(\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} \right) \\
&= T_0(\theta_{(X)}^{(x)}) \left(\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} \right) \\
&= X_x^\#.
\end{aligned} \tag{2.4.7}$$

このことから $\blacktriangleleft^\#$ が \mathbb{R} -線型写像だとわかる。

補題 2.1:

Lie 群 G の C^∞ 多様体 M への右作用 $\blacktriangleleft: M \times G \rightarrow M$ を与える。

このとき $\forall x \in M$ および $\forall X \in \mathfrak{g}$ に対して、 $X^L \in \mathfrak{X}^L(M)$ とその基本ベクトル場 $X^\#$ は $R^{(x)}$ -related である

証明 $\forall g, h \in G$ に対して

$$R^{(x \blacktriangleleft g)}(h) = x \blacktriangleleft g \blacktriangleleft h = x \blacktriangleleft (gh) = x \blacktriangleleft L_g(h) = R^{(x)} \circ L_g(h)$$

が成り立つことに注意する。 $\forall g \in G$ をとり、 $y := R^{(x)}(g) = x \blacktriangleleft g$ とおく。 X^L が左不変ベクトル場であることから

$$\begin{aligned}
X_y^\# &= T_{1_G}(R^{(y)})(X) \\
&= T_{1_G}(R^{(x \blacktriangleleft g)})(X_{1_G}^L) \\
&= T_{1_G}(R^{(x)} \circ L_g)(X_{1_G}^L) \\
&= T_{L_g(1_G)}(R^{(x)}) \circ T_{1_G}(L_g)(X_{1_G}^L) \\
&= T_g(R^{(x)})(X_g^L)
\end{aligned}$$

が言えた。 ■

命題 2.7: $\blacktriangleleft^\#$ は Lie 代数の準同型

Lie 群 G の C^∞ 多様体 M への右作用 $\blacktriangleleft: M \times G \rightarrow M$ を与える。このとき右作用 $\blacktriangleleft^\#$ の無限小生成子

$$\blacktriangleleft^\#: \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{X}(M), X \mapsto X^\#$$

は Lie 代数の準同型である。

証明 $\forall X, Y \in \mathfrak{g}$ をとる。補題 2.1 と Lie ブラケットの自然性から $\forall x \in M$ に対して $[X^L, Y^L]$ と $[X^\#, Y^\#]$ が $R^{(x)}$ -related だと分かる。 i.e.

$$[X^\#, Y^\#]_x = [X^\#, Y^\#]_{R^{(x)}(1_G)} = T_{1_G}(R^{(x)})([X^L, Y^L]_{1_G}) = T_{1_G}(R^{(x)})([X, Y]) = [X, Y]_x^\#$$

が言えた. ■

しばらくの間 Lie 群 G (もしくはその部分群) の Lie 代数を $\text{Lie}(G) := \mathfrak{g}$ と書くことにする^{*35}.

命題 2.8: 基本ベクトル場の零点

Lie 群 G の C^∞ 多様体 M への右作用 $\blacktriangleleft: M \times G \rightarrow M$ を与える. このとき, 以下の2つは同値である:

- (1) $X \in \mathfrak{g}$ の基本ベクトル場 $X^\#$ が点 $x \in M$ において $X_x^\# = 0$ になる
- (2) $X \in \text{Lie}(\text{Stab}(x))$

ただし, $\text{Stab}(x) \subset G$ は点 $x \in M$ の安定化部分群^aである.

^a つまり, $\text{Stab}(x) := \{g \in G \mid x \blacktriangleleft g = x\}$

証明 (1) \iff (2)

$X \in \text{Lie}(\text{Stab}(x))$ ならば $\forall t \in \mathbb{R}$ に対して $\exp(tX) \in \text{Stab}(x)$ である. 従って $x \in M$ の近傍上で定義された任意の C^∞ 関数 f に対して

$$X_x^\# f = \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} f(x \blacktriangleleft \exp(tX)) = \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} f(x) = 0.$$

と計算できる^{*36}

(1) \implies (2)

$X_x^\# = 0$ とする. このとき定数写像 $\gamma: \mathbb{R} \rightarrow M, t \mapsto x$ が

$$\dot{\gamma}(t) = 0 = X_{\gamma(t)}^\#$$

を充たすので, 初期条件 $\gamma(0) = x$ を充たす $X^\# \in \mathfrak{X}(M)$ の極大積分曲線となる. 一方, $\theta_{(X)}^{(x)}: \mathbb{R} \rightarrow M, t \mapsto x \blacktriangleleft \exp(tX)$ もまた同一の初期条件をみたす $X^\#$ の極大積分曲線だったので, その一意性から $\theta_{(X)}^{(x)} = \gamma \iff x \blacktriangleleft \exp(tX) = x \quad \forall t \in \mathbb{R} \iff \exp(tX) \in \text{Stab}(x) \quad \forall t \in \mathbb{R}$ が言えた. 従って $X \in \text{Lie}(\text{Stab}(x))$ である. ■

^{*35} 例えば [?] では, $\text{Lie}(G) := \mathfrak{X}^L(G)$ と定義しているので注意. 同型なので然程問題にはならないが...

^{*36} $f(x \blacktriangleleft \exp(tX))$ が t に関して定数関数なので.

系 2.3:

Lie 群 G の C^∞ 多様体 M への右作用 $\triangleleft: M \times G \rightarrow M$ を与える.

このとき, $\forall x \in M$ の右作用軌道 $R^{(x)}: G \rightarrow M$ の微分

$$T_{1_G}(R^{(x)}): \mathfrak{g} \rightarrow T_x M$$

に対して

$$\text{Ker}(T_{1_G}(R^{(x)})) = \text{Lie}(\text{Stab}(x))$$

が成り立つ.

証明 $\forall X \in \mathfrak{g}$ をとる. (2.4.7) と命題 2.8 から

$$\begin{aligned} X \in \text{Ker}(T_{1_G}(R^{(x)})) &\iff T_{1_G}(R^{(x)})(X) = 0 \\ &\iff X_x^\# = 0 \\ &\iff X \in \text{Lie}(\text{Stab}(x)) \end{aligned}$$

■

2.4.3 主束の接続

さて, Lie 群に関する準備が終わったのでいよいよ主束の接続を定義する. この小節の内容は [?, 第 6 章], [?, §28] が詳しい.

定義 2.12: 主束の接続

$G \curvearrowright P \xrightarrow{\pi} M$ を主束とする. $\forall g \in G$ に対して, 命題 2.2 の右作用によって右作用移動を $R_g: P \rightarrow P, u \mapsto u \triangleleft g$ と定義する.

- 分布 $\{H_u \subset T_u P \mid u \in P\}$ が P 上の接続 (connection) であるとは, 以下の 2 条件が成り立つことを言う:

(C-1) $\forall u \in P$ に対して

$$T_u P = \text{Ker}(T_u \pi) \oplus H_u$$

(C-2) $\forall u \in P, \forall g \in G$ に対して

$$T_u(R_g)(H_u) = H_{R_g(u)}$$

が成り立つ (分布 $\{H_u\}$ は G -不変).

$\text{Ker } T_u(\pi), H_u$ をそれぞれ $T_u P$ の垂直部分空間, 水平部分空間と呼ぶ.

- \mathfrak{g} 値 1 形式 $\omega \in \Omega^1(P; \mathfrak{g})$ が接続形式であるとは, 次の 2 条件を充たすことをいう:

(CF-1) $\forall X \in \mathfrak{g}$ に対して

$$\omega(X^\#) = X$$

(CF-2) $\forall g \in G$ に対して

$$(R_g)^*\omega = \text{Ad}(g^{-1})(\omega)$$

ただし $\text{Ad}: G \longrightarrow \text{GL}(\mathfrak{g})$ は Lie 群 G の随伴表現である。

本題に入る前に、微分幾何学の風習への注意をしておく。境界あり/なし C^∞ 多様体 M とその部分多様体 $S \subset M$ を与える。このとき包含写像を $\iota: S \hookrightarrow M$ と書くと、 $\forall p \in S \subset M$ に対して $T_p S$ を $T_p \iota(T_p S)$ と同一視する^{*37} ことで $T_p M$ の部分ベクトル空間と見做すのである [?, p.116].

さて、主束 $G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ において $\forall u \in P$ を 1 つ固定する。 $G_{\pi(u)} := \pi^{-1}(\{\pi(u)\})$ とおいたとき、 $\forall X \in T_u G_{\pi(u)} \subset T_u P$ (i.e. 点 $u \in P$ におけるファイバー方向の接空間) の、 $\pi: P \longrightarrow M$ の微分による像 $T_u \pi(X) \in T_{\pi(u)} M$ は、上述の注意より勝手な C^∞ 関数 $f \in C^\infty(M)$ に対して

$$T_u \pi(X)f = X(f \circ \pi|_{G_{\pi(u)}})$$

と作用する。然るに C^∞ 写像 $f \circ \pi|_{G_{\pi(u)}}$ は常に値 $f(\pi(u))$ を返す定数写像なので、 $T_u \pi(X)f = 0$ が言える^{*38}。 i.e. $X \in \text{Ker}(T_u \pi)$ であり、

$$T_u G_{\pi(u)} \subset \text{Ker}(T_u \pi)$$

が言えた。一方、 $T_u \pi: T_u P \longrightarrow T_{\pi(u)} M$ は明らかに全射なので $\dim \text{Im}(T_u \pi) = \dim T_{\pi(u)} M$ であり、故にファイバー束の局所自明性と階数-退化次元の定理から

$$\dim \text{Ker}(T_u \pi) = \dim T_u P - \dim T_{\pi(u)} M = \dim T_u G_{\pi(u)} = \dim G \quad (2.4.8)$$

が言える。結局

$$T_u G_{\pi(u)} = \text{Ker}(T_u \pi)$$

だと分かった。さらに次の非常に重要な補題がある。この補題のために基本ベクトル場を導入したと言っても過言ではない：

補題 2.2:

$G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ を主束とする。命題 2.2 で与えた Lie 群 G の全空間 P への右作用 $\triangleleft: P \times G \longrightarrow P$ の無限小生成子 $\triangleleft^\#: \mathfrak{g} \longrightarrow \mathfrak{X}(P)$, $X \longmapsto X^\#$ について、

$$\forall u \in P, \quad \text{Ker}(T_u \pi) = \{X_u^\# \in T_u P \mid X \in \mathfrak{g}\}$$

が成り立つ。

証明 $\forall u \in P$ を 1 つ固定する。

^{*37} つまり $\forall v \in T_p S$ は $\forall f \in C^\infty(S)$ に $v(f)$ として作用するが、 $v \in T_p S \subset T_p M$ と見做す時は $\forall f \in C^\infty(M)$ に、 $T_p \iota(v)f = v(f \circ \iota) = v(f|_S)$ として作用する。

^{*38} 定数関数に接ベクトルを作用させると 0 になる：Leibniz 則より、定数関数 $1: M \longrightarrow \mathbb{R}$, $p \longmapsto 1$ に対して $v(1) = v(1 \cdot 1) = v(1) + v(1) \implies v(1) = 0$ 。 v の線型性から一般の定数関数に対しても 0 になることが言える。

$$\mathrm{Ker}(T_u \pi) \supset \{ X_u^\# \in T_u P \mid X \in \mathfrak{g} \}$$

$\forall X \in \mathfrak{g}$ をとる. このとき (2.4.7) より $X_u^\# = T_{1_G}(R^{(u)})(X)$ だが, $\pi \circ R^{(u)}$ は定数写像なので

$$\begin{aligned} T_u \pi(X_u^\#) &= T_u \pi \circ T_{1_G}(R^{(u)})(X) \\ &= T_{1_G}(\pi \circ R^{(u)})(X) \\ &= 0 \end{aligned}$$

が分かる. i.e. $X_u^\# \in \mathrm{Ker}(T_u \pi)$ である.

$$\mathrm{Ker}(T_u \pi) \subset \{ X_u^\# \in T_u P \mid X \in \mathfrak{g} \}$$

まず, \mathbb{R} -線型写像

$$T_{1_G}(R^{(u)}): \mathfrak{g} \longrightarrow \mathrm{Ker}(T_u \pi)$$

がベクトル空間の同型写像であることを示す. 系 2.3 から $\mathrm{Ker} T_{1_G}(R^{(u)}) = \mathrm{Lie}(\mathrm{Stab}(u))$ だが, 命題 2.2 より右作用 \blacktriangleleft は自由なので $\mathrm{Stab}(u) = \{1_G\}$ である. 従って $\mathrm{Ker} T_{1_G}(R^{(u)}) = \{0\}$ であり, $T_{1_G}(R^{(u)})$ は単射. (2.4.8) より $\dim \mathfrak{g} = \dim G = \dim \mathrm{Ker}(T_u \pi)$ なので $T_{1_G}(R^{(u)})$ はベクトル空間の同型写像である.

以上より, $\forall v \in \mathrm{Ker}(T_u \pi)$ に対して $(T_{1_G}(R^{(u)}))^{-1}(v) \in \mathfrak{g}$ であり, (2.4.7) から

$$v = T_{1_G}(R^{(u)})\left((T_{1_G}(R^{(u)}))^{-1}(v)\right) = \left((T_{1_G}(R^{(u)}))^{-1}(v)\right)_u^\#$$

が言えた.

■

接続の定義は幾何学的にわかりやすいが, 計算は絶望的である. 幸いにして主束の接続を与えることと, 全空間上の**接続形式**を与えることは同値なのでなんとかなる:

定理 2.4: 接続と接続形式の関係

$G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ を主束とする.

(1) $\omega \in \Omega^1(P; \mathfrak{g})$ が**接続形式**ならば, 分布

$$\{ \mathrm{Ker} \omega_u \subset T_u P \mid u \in P \}$$

は P 上の**接続**である.

(2) (1) は P 上の接続形式全体の集合から P 上の接続全体の集合への 1 対 1 対応を与える.

証明 (1) $\forall u \in P$ を 1 つ固定する. 命題 2.2 で与えた Lie 群 G の全空間 P への右作用 $\blacktriangleleft: P \times G \longrightarrow P$ の無限小生成子 $\blacktriangleleft^\#: \mathfrak{g} \longrightarrow \mathfrak{X}(P)$, $X \mapsto X^\#$ を考える.

(C-1)

接続形式の定義から $\forall X \in \mathfrak{g}$ に対して $\omega(X^\#) = X$ が成り立つ. i.e. $\omega_u: T_u P \longrightarrow \mathfrak{g}$ は全射であり, \mathbb{R} -線型写像の系列^{*39}

$$0 \longrightarrow \mathrm{Ker} \omega_u \xrightarrow{i} T_u P \xrightarrow{\omega_u} \mathfrak{g} \longrightarrow 0$$

^{*39} i は包含準同型なので $\mathrm{Ker} \omega_u = \mathrm{Im} i$. ω_u が全射なので $\mathrm{Im} \omega_u = \mathfrak{g} = \mathrm{Ker} 0$.

は短完全列になる．さらにこれは補題 2.2 の証明で与えた線型写像 $(T_{1G}(R^{(u)}))^{-1}: \mathfrak{g} \rightarrow \text{Ker}(T_u\pi) \subset T_uP$ によって分裂するので

$$T_u \cong \mathfrak{g} \oplus \text{Ker } \omega_u \cong \text{Ker}(T_u\pi) \oplus \text{Ker } \omega_u$$

がわかる．

(C-2)

$\forall v \in \text{Ker } \omega_u$ をとる．このとき (CF-2) より $\forall g \in G$ に対して

$$\omega_{u \blacktriangleleft g}(T_u(R_g)(v)) = ((R_g)^*\omega)_u(v) = \text{Ad}(g^{-1})(\omega_u(v)) = 0$$

が従い, $T_u(R_g)(\text{Ker } \omega_u) \subset \text{Ker } \omega_{u \blacktriangleleft g}$ が言えた．両辺の次元が等しいので $T_u(R_g)(\text{Ker } \omega_u) = \text{Ker } \omega_{u \blacktriangleleft g}$ が言えた．

(2)

(単射性)

接続形式 $\omega, \eta \in \Omega^1(P; \mathfrak{g})$ に対して $\{\text{Ker } \omega_u \mid u \in P\} = \{\text{Ker } \eta_u \mid u \in P\}$ が成り立つとする．このとき $\forall u \in P$ に対して $\text{Ker } \omega_u = \text{Ker } \eta_u$ が成り立つ．補題 2.2 および (1) から $T_uP = \text{Ker}(T_u\pi) \oplus \text{Ker } \omega_u = \{X_u^\# \mid X \in \mathfrak{g}\} \oplus \text{Ker } \omega_u$ の直和分解があり, $\forall v \in T_uP$ に対して $V \in \mathfrak{g}, v^H \in \text{Ker } \omega_u = \text{Ker } \eta_u$ が一意的に存在して $v = V_u^\# + v^H$ と書ける．よって (CF-1) から

$$\omega_u(v) = \omega_u(V_u^\#) = V = \eta_u(V_u^\#) = \eta_u(v)$$

が分かった．i.e. $\omega_u = \eta_u$ である． u は任意だったので $\omega = \eta$ が言えた．

(全射性)

主束 $G \hookrightarrow P \xrightarrow{\pi} M$ の接続 $\{H_u \subset T_uP \mid u \in P\}$ を与える． $\forall u \in P$ に対して直和分解 $T_uP = \text{Ker}(T_u\pi) \oplus H_u$ の垂直, 水平部分空間成分への射影をそれぞれ

$$\begin{aligned} i_1: T_uP &\longrightarrow \text{Ker}(T_u\pi), v^V + v^H \longmapsto v^V \\ i_2: T_uP &\longrightarrow H_u, v^V + v^H \longmapsto v^H \end{aligned}$$

と書き, $\omega \in \Omega^1(P; \mathfrak{g})$ を, $\forall u \in P$ に対して補題 2.2 の証明で与えた同型写像 $T_{1G}(R^{(u)}): \mathfrak{g} \rightarrow \text{Ker}(T_u\pi)$ を用いて

$$\omega_u := (T_{1G}(R^{(u)}))^{-1} \circ i_1: T_uP \xrightarrow{i_1} \text{Ker}(T_u\pi) \xrightarrow{(T_{1G}(R^{(u)}))^{-1}} \mathfrak{g}$$

と定義する．この ω が (CF-1), (CF-2) を満たすことを示す：

(CF-1) $\forall u \in P$ を 1 つ固定する． $\forall X \in \mathfrak{g}$ をとる．補題 2.2 より $X_u^\# \in \text{Ker}(T_u\pi)$ だから, (2.4.7) より

$$\begin{aligned} \omega_u(X_u^\#) &= (T_{1G}(R^{(u)}))^{-1} \circ i_1(X_u^\#) \\ &= (T_{1G}(R^{(u)}))^{-1}(X_u^\#) \\ &= (T_{1G}(R^{(u)}))^{-1}(T_{1G}(R^{(u)})(X)) \\ &= X \end{aligned} \tag{2.4.9}$$

が言えた．

(CF-2)

$\forall u \in P$ を1つ固定する. $\forall g \in G$ をとる. 示すべきは $\forall v \in T_u P$ に対して

$$((R_g)^* \omega)_u(v) = \omega_{R_g(u)}(T_u(R_g)(v)) = \text{Ad}(g^{-1})(\omega_u(v))$$

が成り立つことである. 実際 $i_1(v) \in \text{Ker}(T_u \pi)$ に対しては, 補題 2.2 からある $V \in \mathfrak{g}$ が一意的に存在して $i_1(v) = V_u^\#$ と書けるので

$$\begin{aligned} \omega_{R_g(u)}(T_u(R_g)(i_1(v))) &= \omega_{u \blacktriangleleft g}(T_u(R_g)(V_u^\#)) \\ &= \omega_{u \blacktriangleleft g}(T_u(R_g) \circ T_{1_G}(R^{(u)})(V)) \quad \because (2.4.7) \\ &= \omega_{u \blacktriangleleft g}(T_{1_G}(R_g \circ R^{(u)})(V)) \end{aligned}$$

となるが, $\forall x \in G$ に対して

$$\begin{aligned} R_g \circ R^{(u)}(x) &= u \blacktriangleleft x \blacktriangleleft g = u \blacktriangleleft (xg) = u \blacktriangleleft (gg^{-1}xg) \\ &= (u \blacktriangleleft g) \blacktriangleleft (g^{-1}xg) = R^{(u \blacktriangleleft g)} \circ F_{g^{-1}}(x) \end{aligned}$$

が成り立つ^{*40}ことから

$$\begin{aligned} \omega_{u \blacktriangleleft g}(T_{1_G}(R_g \circ R^{(u)})(V)) &= \omega_{u \blacktriangleleft g}(T_{F_{g^{-1}}(1_G)}(R^{(u \blacktriangleleft g)}) \circ T_{1_G}(F_{g^{-1}})(V)) \\ &= \omega_{u \blacktriangleleft g}(T_{1_G}(R^{(u \blacktriangleleft g)}) \circ \text{Ad}(g^{-1})(V)) \quad \because \text{Ad の定義} \\ &= \omega_{u \blacktriangleleft g}((\text{Ad}(g^{-1})(V))_{u \blacktriangleleft g}^\#) \quad \because (2.4.7) \\ &= (T_{1_G}(R^{(u \blacktriangleleft g)}))^{-1} \circ T_{1_G}(R^{(u \blacktriangleleft g)}) \circ \text{Ad}(g^{-1})(V) \quad \because (2.4.9) \\ &= \text{Ad}(g^{-1})(V) \\ &= \text{Ad}(g^{-1})\omega_u(V_u^\#) \quad \because (2.4.9) \\ &= \text{Ad}(g^{-1})\omega_u(i_1(v)) \end{aligned}$$

が言える. $i_2(v) \in H_u$ に関しては, (C-2) から $T_u(R_g)(i_2(v)) \in H_{u \blacktriangleleft g}$ なので

$$\begin{aligned} \omega_{R_g(u)}(T_u(R_g)(i_2(v))) &= (T_{1_G}(R^{(u \blacktriangleleft g)}))^{-1} \circ i_1(T_u(R_g)(i_2(v))) \\ &= 0 \\ &= \text{Ad}(g^{-1})(\omega_u(i_2(v))) \end{aligned}$$

が言える. $v = i_1(v) + i_2(v)$ なので証明が完了した. ■

^{*40} 記号は【例 2.4.4】を参照

2.4.4 同伴ベクトル束上の共変微分

【例 2.4.3】を思い出すと、主束に与えられた接続形式が自然に同伴ベクトル束上の接続と結び付くような気がする。実際それは正しい。

定理 2.5: 同伴ベクトル束上の接続

2.5 特性類と Chern-Simons 形式
