

エルゴード理論に於るらせんの展開 についての一注意

東北大 理 島野 岳

(I) 最近 [1] に於て、Kolmogorov 系の時間変更の研究に
確率過程論に於る Martingale 理論の手法が導入された。

本稿では その一つの結果である確率空間上の二乗可積分
函数の Martingale 積分に依る展開定理について一つの注意を
与える。

今 $(\Omega, \mathcal{F}, \mathcal{P})$ を 完備な確率空間で $L^2(\Omega)$ は可分なものと
する。 Ω 上の可逆な保測変換の一径数群 $(\theta_t)_{t \in \mathbb{R}}$ が flow
であるとは 条件

$\mathcal{U} =$ ヌリ作用素の一径数群 $(T_t)_{t \in \mathbb{R}}$;

$$(T_t f)(\omega) \equiv f \circ \theta_t^{-1}(\omega) \quad , \quad f \in L^2(\Omega)$$

が 強連続 (L^2 -ノルムの意味で)

を満す: ととする。

$(\mathcal{F}_t)_{t \in \mathbb{R}}$ は $\mathcal{F}$ の部分 σ -代数の増大列で

$$\mathcal{F} = \bigvee_t \mathcal{F}_t \quad , \quad \mathcal{F}_\infty \equiv \bigcap_t \mathcal{F}_t \quad , \quad \text{trivial}$$

なるものとする。且つ $(\mathcal{F}_t)_{t \in \mathbb{R}}$ は条件

f が $\mathcal{F}_0$ -可測ならば $T_t f$ は $\mathcal{F}_{0+t}$ -可測^となる

と満すものとする。

この時 $\{(\theta_t)_{t \in \mathbb{R}}, (\mathcal{F}_t)_{t \in \mathbb{R}}\}$ は Kolmogorov 系、又は純非決定的であると言われる。

明らかに $(\mathcal{F}_t)_{t \in \mathbb{R}}$ は 右側及び左側に連続、即ち

$$\mathcal{F}_t = \bigvee_{s < t} \mathcal{F}_s, \quad \mathcal{F}_t = \bigcap_{s > t} \mathcal{F}_s$$

である。以下 $\{(\theta_t), (\mathcal{F}_t)\}$ は Kolmogorov 系とする。

定義 1. 過程 $(Z_t)_{t \in \mathbb{R}}$ が $\{(\theta_t), (\mathcal{F}_t)\}$ に関して 直交増分^と持つ 螺旋 (helix) であるとは、各 t について $Z_t \in L^2(\Omega)$ であり且つ条件

$$(1) \quad Z_0 = 0$$

$$(2) \quad \forall s, t \in \mathbb{R}, s < t \text{ ならば } Z_t - Z_s \text{ は } \mathcal{F}_t\text{-可測}$$

$$(3) \quad \forall s, t \in \mathbb{R}, s < t \text{ ならば } Z_t - Z_s \in L^2(\mathcal{F}_s)^\perp \quad (L^2(\Omega) \text{ の } \mathcal{F}_s\text{-可測なる閉部分空間の直交補空間})$$

$$(4) \quad \forall s, t, h \in \mathbb{R}, \quad Z_{t+h} - Z_{s+h} = T_h(Z_t - Z_s)$$

と満すことである。

この定義から直ちに 各 $s \in \mathbb{R}$ に対して $(Z_{t+s} - Z_s)_{t \in \mathbb{R}_+}$ は $(\mathcal{F}_{t+s})_{t \in \mathbb{R}_+}$ についての二乗可積分 martingale である。且つ

$$\|Z_{t+s} - Z_s\|^2 = k|t| \quad (k \text{ は正の定数})$$

である。 $k=1$ の時 $Z \equiv (Z_t)_{t \in \mathbb{R}}$ は正規化されていると言

られる。

次に、直交増分を持つら旋の集合 $\mathcal{F}_Z$ に

$$(Z, Z') \equiv E[Z_1 Z'_1] \quad , \quad Z, Z' \in \mathcal{F}_Z$$

によって内積を導入し $\mathcal{F}_Z$ を Hilbert 空間とみる。今 $\mathcal{F}_Z \ni \{Z_t - Z_\Delta, t, \Delta \in \mathbb{R}\}$ から生成される線形閉部分空間 ($L^2(\Omega)$ の) とすると次の定理が成り立つ。

(Stone-von Neumann の定理) $\mathcal{F}_Z$ の内積の意味で互いに直交する直交増分を持つら旋の列 $\{Z^n\}_{n=1}^\infty \equiv \{(Z_t^n)_{t \in \mathbb{R}}\}_{n=1}^\infty$ があって
正規化された

$$L^2(\Omega) = \mathbb{C} \oplus \sum_{n=1}^\infty \mathcal{F}_{Z^n}$$

と書ける。ここに $\mathbb{C}$ は常数函数のみを閉部分空間である。

定義 2. 過程 $(A_t)_{t \in \mathbb{R}}$ が増加ら旋であるとは、条件

$$(1) \quad A_0 = 0, \quad \phi(\omega; A_\cdot(\omega) \neq 0) > 0$$

$$(2) \quad \forall \Delta, t \in \mathbb{R} \quad \Delta < t \quad \text{ならば} \quad A_t - A_\Delta \text{ は } \mathcal{F}_t\text{-可測}$$

$$(3) \quad \forall \Delta, t, h \in \mathbb{R} \quad A_{t+h} - A_{\Delta+h} = (A_t - A_\Delta) \cdot \theta_h^{-1}$$

先の直交増分を持つら旋とこの増加ら旋との間には次の関係がある。これは、martingale 理論での二乗可積分函数 ~~は~~ martingale の Doob 分解に対応するものである。

(分解定理) $Z = (Z_t)_{t \in \mathbb{R}}$ を直交成分を持つら旋とする。その時可積分且つ predictable な増加ら旋 $(A_t)_{t \in \mathbb{R}}$ が存在して 各 Δ について

$$[(Z_{\Delta+t} - Z_\Delta)^2 - (A_{\Delta+t} - A_\Delta)]_{t \in \mathbb{R}_+}$$

は $(\mathcal{F}_{s+t})_{t \geq 0}$ に関し martingale とする。 $\langle Z, Z \rangle_t \equiv A_t$ とかく。

更に増加ら旋には次の性質がある。

(Radon-Nikodym の定理) $A=(A_t)$, $B=(B_t)$ を増加ら旋とする。今 a.s. $\omega \in \Omega$ に対して $\mathbb{R}$ 上の測度として $dB(\omega)$ が $dA(\omega)$ に関して絶対連続ならば、非負で $\mathcal{F}_0$ -可測なる確率変数 u が存在して a.s. $\omega \in \Omega$ に対し、

$$B_t(\omega) = \int_0^t u \circ \theta_s^{-1}(\omega) dA_s(\omega) \quad -\infty < t < \infty$$

とかける。

次に直交増分を持つら旋の空間 $\mathcal{H}_T$ に先の直交性よりも強い狭義の直交性を定義する。今 $Z, Z' \in \mathcal{H}_T$ に対して

$$\langle Z, Z' \rangle \equiv \frac{1}{2} (\langle Z+Z', Z+Z' \rangle - \langle Z, Z \rangle - \langle Z', Z' \rangle)$$

とおき、 $\langle Z, Z' \rangle = 0$ 即ち各 t について $\langle Z, Z' \rangle_t = 0$ なる時 Z, Z' は狭義に直交すると言う。分解定理から $\langle Z, Z' \rangle = 0$ であるとは $(Z_t Z'_t)_{t \geq 0}$ が martingale なる：とと同値である。即ち $E[Z_t Z'_t] = E[Z_1 Z'_1] = 0$ 。故に狭義直交ならば直交する。

$\{(Z^n)\}_{n=1}^\infty$ (有限族ならばそれ以外は 0 を考えて) を互いに狭義に直交する直交増分を持つら旋 ~~系~~ ^(正規化した) の集合の最大元とする。その時、次の定理が成り立つ。

定理 任意の直交増分を持つら旋 Z に対して、各 $\mathcal{F}_0$ -可測変数の列 $\{u^n\}_{n=1}^\infty$ で 各 t に対し

$$\sum_{n=1}^\infty E \left[\int_0^t (u^n)^2 \circ \theta_s^{-1} d\langle Z^n, Z^n \rangle_s \right] < \infty$$

なるものが存在し、 $t \in \mathbb{R}_+$ に対し

$$Z_t = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t u^n \circ \theta_s^{-1} dZ_s^n$$

とかける。この性質を持つ列 $\{Z^n\}$ を直交増分を持つら旋の基と呼ぶ。

定理の積分の意味は martingale に関する確率積分に対応するものである。以下その定義を与える。但しここでは必要とするだけに制限したものを認す。

定義3. Z を直交成分を持つら旋、 u を $\mathcal{F}_0$ -可測で各 t について

$$E\left[\int_0^t u^2 \circ \theta_s^{-1} d\langle Z, Z \rangle_s\right] < \infty$$

なるものとする。その時次の性質を持つ直交増分を持つら旋 $U \cdot Z$ が一意に定まる。：任意の $Z' \in \mathcal{H}_Z$ に対し

$$\langle U \cdot Z, Z' \rangle_t = \int_0^t u \circ \theta_s^{-1} d\langle Z, Z' \rangle_s.$$

この $U \cdot Z$ を $\int_0^t u \circ \theta_s^{-1} dZ_s$ とかく。

系. $X \in L^2(Q)$ は次の表現を持つ。

$$X = c + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^n \circ \theta_s^{-1} dZ_s^n$$

ここに c は定数。また

$$\|X\|_2^2 = c^2 + \sum_{n=1}^{\infty} E\left[\int_{-\infty}^{+\infty} (x^n)_{\theta_s^{-1}}^2 d\langle Z^n, Z^n \rangle_s\right]$$

にある。

(II) 以上が [1] に依るものである。ここではこの定理が次の形で成立することと注意する。系についても同様のことが言える。

定理 次の性質を持つ直交増分を持つラ旋の基 $\{Y^n\}_{n=1}^{\infty}$ が存在する。任意の直交増分を持つラ旋 Z に対して、各 t_0 -可測な確率変数の列 $\{v^n\}_{n=1}^{\infty}$ で 各 t に対して

$$\sum_{n=1}^{\infty} E\left[\int_0^t (v^n)^2 \cdot \theta_s^{-1} d\langle Y^n, Y^n \rangle\right] < \infty$$

なるものが存在し、

$$Z_t = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t v^n \cdot \theta_s^{-1} dY_s^n$$

且つ a.s. $\omega \in \Omega$ に対して R_+ 上の測度として

$$d\langle Y^1, Y^1 \rangle_t(\omega) > d\langle Y^2, Y^2 \rangle_t(\omega) > \dots > d\langle Y^n, Y^n \rangle_t > d\langle Y^{n+1}, Y^{n+1} \rangle_t > \dots$$

である。ここに $>$ は右から左に読まして絶対連続なることを示す。

この証明のために次の補題と要する。

増

補題 $\{Z^n\}_{n=1}^{\infty}$ は互いに狭義直交なる直交増分を持つラ旋

とし
$$Z_t^{(N)} = \sum_{n=1}^N Z_t^n \longrightarrow Z_t^{(\infty)} \quad (n \rightarrow \infty)$$

とする。(各 t について L^2 -ノルムの意味で。それ故 $Z^{(\infty)}$ も再び直交増分を持つラ旋となる。) その時 各 t に対し

$$\langle Z^{(\infty)}, Z^{(\infty)} \rangle_t = \sum_{n=1}^{\infty} \langle Z^n, Z^n \rangle_t \quad \text{a.s.}$$

証明. 今 $\sum_{n=1}^{\infty} \langle Z^n, Z^n \rangle_t$ の Cauchy 列を考えると 分解定理から

$$(1) \quad E\left[\left|\sum_{n=k}^l \langle Z^n, Z^n \rangle_t\right|\right] = E\left[\sum_{n=k}^l (Z_t^n)^2\right]$$

条件から $n \rightarrow \infty$ とすると (1) で

$$E\left[\left(\sum_{n=k}^l (Z_t^n)^2\right)\right] = E\left[\sum_{n=k}^l (Z_t^n)^2\right] + E\left[\sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} Z_t^i Z_t^j\right]$$

$$= E\left[\sum_{n=k}^1 (Z_t^n)^2\right]$$

より右辺は 0 に収束する。即ち $\sum_{n=1}^{\infty} \langle Z^n, Z^n \rangle_t$ は L^1 -ノルム の 意味で収束。更に明らかに

$$\sum_{n=1}^N \langle Z^n, Z^n \rangle_t \quad (= \langle Z^{(N)}, Z^{(N)} \rangle)$$

は単調増加列故。 $\sum_{n=1}^{\infty} \langle Z^n, Z^n \rangle_t$ は a.s. 収束である。

$$\begin{aligned} E[(Z_t^0)^2 - \sum_{n=1}^N (Z_t^n)^2] &= E\left[\sum_{n=N+1}^{\infty} (Z_t^n)^2\right] \\ &= E\left[\sum_{n=N+1}^{\infty} \langle Z^n, Z^n \rangle_t\right] \end{aligned}$$

(定理の証明) $\{Z^n\}_{n=1}^{\infty}$ は (I) の定理のものとする。今各 t で

$$Z_t^0 \equiv \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{n/2}} Z_t^n$$

とおくと、補題から

$$\langle Z^0, Z^0 \rangle_t = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \langle Z^n, Z^n \rangle_t \quad \text{a.s.}$$

故に a.s. $\omega \in \Omega$ に対して 各 $d\langle Z^n, Z^n \rangle_t$ は $d\langle Z^0, Z^0 \rangle_t$ に関して絶対連続となる。故に Radon-Nikodym の定理から 各 $\mathcal{F}_0$ -可測な $\{g^n\}$ が存在し

$$\langle Z^n, Z^n \rangle_t = \int_0^t g^n \circ \theta_s^{-1} d\langle Z^0, Z^0 \rangle_s$$

今 g^n の定義されていない ω に対しては $g^n(\omega) = 0$ とおく。故に g^n は Ω 上すべて定義されることになる。= 帰納法により次の集合列を定める。

$$A_m \equiv \{\omega : g^m(\omega) \neq 0\}$$

$$m \leq n \quad A_{11} \equiv A_1, \quad A_{1n} \equiv A_n - \bigcup_{\nu=1}^{n-1} A_\nu$$

$$A_{mn} \equiv A_m - \bigcup_{\mu=1}^{m-1} A_{\mu m}$$

$$A_{mn} \equiv A_n - \bigcup_{\mu=1}^{m-1} A_{\mu n} - \bigcup_{\nu=m}^{n-1} A_{m\nu} \quad (m < n)$$

作り方から明らかに各 n に対して $\{A_{mn}\}_{m=1}^n$ は互いに素で

$$A_n = \bigcup_{m=1}^n A_{mn}.$$

これに対し

$$Y_t^m \equiv \sum_{n=m}^{\infty} \frac{1}{n} \int_0^t 1_{A_{mn}} \circ \theta_s^{-1} dZ_s^n$$

とおく。この $\{Y^m\}$ が求めるものであることを示す。

(i) $\{Y^m\}$ は互いに狭義に直交する。

$\therefore m > m'$ とすると、補題と確率積分の性質から

$$\begin{aligned} \langle Y^{m'}, Y^m \rangle_t &= \left\langle \sum_{n=m'}^m \frac{1}{n} \int_0^t 1_{A_{mn}} \circ \theta_s^{-1} dZ_s^n, Y^m \right\rangle \\ &+ \sum_{n=m}^{\infty} \frac{1}{n^2} \int_0^t 1_{A_{mn}} 1_{A_{m'n}} \circ \theta_s^{-1} d\langle Z^n, Z^n \rangle_s = 0 \end{aligned}$$

(ii) 基であること。

今 $v^n \equiv nu^n$ とおく。

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^n \int_0^t 1_{A_{mn}} \circ \theta_s^{-1} dZ_s^n &= \int_0^t 1_{\bigcup_{m=1}^n A_{mn}} \circ \theta_s^{-1} dZ_s^n \\ &= \int_0^t dZ_s^n = Z_t^n \end{aligned}$$

であり、 Z_t は定理から

$$Z_t = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t u^n \circ \theta_s^{-1} dZ_s^n = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n \frac{1}{n} \int_0^t v^n \circ 1_{A_{mn}} \circ \theta_s^{-1} dZ_s^n$$

これは $\sum_{m=1}^{\infty} \int_0^t v^m \circ \theta_s^{-1} dY_s^m$ に等しい。

何故ならば

$$\langle Z^m, Z^n \rangle_t = \int_0^t u^n \circ \theta_s^{-1} d\langle Z^n, Z^n \rangle_s$$

$$\begin{aligned}
\left\langle \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^t v^n \circ \theta_s^{-1} dY_s^m, Z^n \right\rangle_t &= \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^t v^n \circ \theta_s^{-1} d\langle Y_s^m, Z^n \rangle_s \\
&= \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^t (v^n \circ \theta_s^{-1}) \cdot \frac{1}{n} d\langle Z^n, Z^n \rangle_s \\
&\quad (\text{直交性と補題から})
\end{aligned}$$

故に (Z^n) の最大であることから等しくなる。

(iii) 絶対連続性について

$$\psi_m(\omega) \equiv \begin{cases} \frac{1}{n^2} g^n & , \omega \in A_{mn} : n=m, m+1, \dots \\ 0 & , \omega \notin \bigcup_{n=m}^{\infty} A_{mn} \end{cases}$$

とおく

$$\begin{aligned}
\langle Y^m, Y^m \rangle_t &= \sum_{n=m}^{\infty} \frac{1}{n^2} \int_0^t 1_{A_{mn}} \circ \theta_s^{-1} d\langle Z^n, Z^n \rangle_s \\
&= \sum_{n=m}^{\infty} \frac{1}{n^2} \int_0^t 1_{A_{mn}} \cdot g^n \circ \theta_s^{-1} d\langle Z^0, Z^0 \rangle_s \\
&= \int_0^t \psi_m \circ \theta_s^{-1} d\langle Z^0, Z^0 \rangle_s
\end{aligned}$$

また

$$\begin{aligned}
\bigcup_{n=m}^{\infty} A_{mn} &= \bigcup_{n=m}^{\infty} (A_n - \bigcup_{\mu=1}^{m-1} A_{\mu n}) \\
&\supset \bigcup_{n=m+1}^{\infty} (A_n - \bigcup_{\mu=1}^m A_{\mu n}) = \bigcup_{n=m+1}^{\infty} A_{m+1 n}
\end{aligned}$$

一方 $\omega \notin \bigcup_{n=m}^{\infty} A_{mn}$ に限り $\psi_m(\omega) = 0$ 故にこの時 $\psi_{m+1}(\omega) = 0$

故に $d\langle Y^{m+1}, Y^{m+1} \rangle_t$ は $d\langle Y^m, Y^m \rangle_t$ に関して絶対連続。

文献

- [1] J. de Sam Lazaro et P.A. Meyer, Méthodes de martingales
et théorie des flots Z. Wahrscheinlichkeitstheorie verw.
Geb. 18 (1971)