

課題研究bレポート

加納基晴

以下では (Ω, \mathcal{F}, P) を確率空間とする.

1 末尾事象と infinite often

定義 1. 末尾事象 (*tail event*)

X_1, X_2, \dots を確率変数列とする.

$E \in \sigma(X_1, X_2, \dots)$ が末尾事象 (*tail event*) であるとは $E \in \sigma(X_n, X_{n+1}, \dots)$ ($\forall n \in \mathbb{N}$) が成立することである.

末尾加法族 (*tail σ -field*) δ を $\delta = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} \sigma(X_n, X_{n+1}, \dots)$ と定める.

定義から末尾加法族の元 $E \in \delta$ は末尾事象となる.

定理 2. 近似定理

X_1, X_2, \dots を確率変数列とする.

$\forall A_1 \in \sigma(\mathbf{X}), \forall \varepsilon > 0$ に対して, ある $n \in \mathbb{N}, A_2 \in \mathcal{F}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ が存在して $P(A_1 \Delta A_2) \leq \varepsilon$ となる.
(ただし $A \Delta B := (A - B) \cup (B - A)$)

Proof.

$\forall A_1 \in \sigma(\mathbf{X}), \forall \varepsilon > 0$ を固定する.

$\mathcal{F}_0 = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \sigma(X_1, X_2, \dots, X_n), \mathcal{C} = \{A \in \mathcal{F} \mid \forall \varepsilon > 0 \text{ に対して, } \exists B \in \mathcal{F}_0 \text{ s.t. } P(A \Delta B) \leq \varepsilon\}$ と定める.

$\mathcal{F}_0 \subset \mathcal{C}$ は明らかだから, \mathcal{C} が σ 加法族であることを示せば, $\sigma(\mathcal{F}_0) \subset \mathcal{C}$ で, $\sigma(\mathcal{F}_0) = \sigma(\mathbf{X})$ であることから, $A_1 \in \sigma(\mathbf{X}) \subset \mathcal{C}$ なので, $\exists A_2 \in \mathcal{F}_0 \text{ s.t. } P(A_1 \Delta A_2) \leq \varepsilon$ となり、定理が成立するのがわかる.

• \mathcal{C} が σ 加法族であることを示す.

(i) $\Omega \in \mathcal{C}$ ($\because \Omega \in \mathcal{F}_0$)

(ii) $\forall A \in \mathcal{C}$ に対して, $A^c \in \mathcal{C}$

$\because \forall \varepsilon > 0$ を固定する. このとき $B \in \mathcal{F}_0$ が取れて, $P(A \Delta B) \leq \varepsilon$ となる. \mathcal{F}_0 の定め方から, $B^c \in \mathcal{F}_0$ であって, $P(A^c \Delta B^c) = P((A^c \cap B) \cup (A \cap B^c)) = P((B - A) \cup (A - B)) = P(A \Delta B) \leq \varepsilon$
 $\therefore A^c \in \mathcal{C}$

(iii) $\forall \{A_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{C}, \forall \varepsilon > 0$ をとる. $\{B_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{F}_0$ を $P(A_n \Delta B_n) \leq \frac{\varepsilon}{2^{n+1}}$ となるようにとる.

また, 測度の上からの連続性から ある $N \in \mathbb{N}$ が取れて, $P(\bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n) \leq \frac{\varepsilon}{2}$ となる.

ここで, $\bigcup_{n=1}^N B_n \Delta \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \subset (\bigcup_{n=1}^N B_n \Delta A_n) \cup \bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n$ を示せば, 単調性と劣加法性から,

$$\begin{aligned}
P\left(\bigcup_{n=1}^N B_n \triangle \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) &\leq P\left(\left(\bigcup_{n=1}^N B_n \triangle A_n\right) \cup \bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n\right) \leq \sum_{n=1}^N P(B_n \triangle A_n) + P\left(\bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n\right) \\
&\leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon \text{ となる. } \bigcup_{n=1}^N B_n \in \mathcal{F}_0 \text{ であることから } \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{C} \text{ となる.}
\end{aligned}$$

- $\bigcup_{n=1}^N B_n \triangle \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \subset \left(\bigcup_{n=1}^N B_n \triangle A_n\right) \cup \bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n$ を示す.

$$\begin{aligned}
\because \omega \in \bigcup_{n=1}^N B_n \triangle \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n &\Leftrightarrow (\omega \in \bigcup_{n=1}^N B_n - \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n) \vee (\omega \in \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n - \bigcup_{n=1}^N B_n) \\
&\Leftrightarrow (\omega \in \bigcup_{n=1}^N B_n \cap \bigcap_{n=1}^{\infty} A_n^c) \vee (\omega \in (\bigcup_{n=1}^N A_n \cap \bigcap_{n=1}^N B_n^c) \cup (\bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n \cap \bigcap_{n=1}^N B_n^c)) \\
&\Rightarrow (\omega \in \bigcup_{n=1}^N B_n \cap \bigcap_{n=1}^N A_n^c) \vee (\omega \in (\bigcup_{n=1}^N A_n \cap \bigcap_{n=1}^N B_n^c) \cup \bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n) \\
&\Rightarrow \omega \in \bigcup_{n=1}^N (B_n \cap A_n^c) \vee (\omega \in (\bigcup_{n=1}^N A_n \cap B_n^c) \cup \bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n) \\
&\Leftrightarrow \omega \in \bigcup_{n=1}^N ((B_n \cap A_n^c) \cup (A_n \cap B_n^c)) \vee \omega \in \bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n \\
&\Leftrightarrow \omega \in \bigcup_{n=1}^N (B_n \triangle A_n) \vee \omega \in \bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n \\
&\Leftrightarrow \omega \in \bigcup_{n=1}^N (B_n \triangle A_n) \cup \bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n \quad \therefore \bigcup_{n=1}^N B_n \triangle \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \subset \left(\bigcup_{n=1}^N B_n \triangle A_n\right) \cup \bigcup_{n=N+1}^{\infty} A_n
\end{aligned}$$

(i) ~ (iii) より \mathcal{C} は σ 加法族である.

□

定理 3. Kolmogorov zero-one law

X_1, X_2, \dots を独立な確率変数とする. この時, $E \in \delta$ であるとすれば $P(E)$ は 0, 1 のいずれかの値をとる.

Proof.

$\forall E \in \delta$ をとる. $E \in \sigma(\mathbf{X})$, であるから, 定理 2 により各 $n \in \mathbb{N}$ に対して, ある $E_n \in \sigma(X_1, X_2, \dots, X_n)$ が取れて $P(E \triangle E_n) \rightarrow 0$ となる. このことから $P(E_n) \rightarrow P(E)$,

$P(E_n \cup E) \rightarrow P(E)$ がわかる.

\therefore

- $P(E_n) \rightarrow P(E)$

$P(E_n) \leq P((E_n - E) \cup E) \leq P(E_n - E) + P(E)$ から $P(E_n) - P(E) \leq P(E_n - E) \leq P(E_n \triangle E) \rightarrow 0$ ($n \rightarrow \infty$). 同様に $P(E) - P(E_n) \leq P(E - E_n) \leq P(E_n \triangle E) \rightarrow 0$ がわかる.

- $P(E_n \cup E) \rightarrow P(E)$

$P(E \cup E_n) \leq P((E_n - E) \cup E) \leq P(E_n - E) + P(E) \leq P(E_n \triangle E) + P(E)$ から

$P(E \cup E_n) - P(E) \leq P(E_n \triangle E) \rightarrow 0$ ($n \rightarrow \infty$). また, $E \subset (E \cup E_n) \cup (E \triangle E_n)$ だから $P(E) - P(E \cup E_n) \leq P(E \triangle E_n) \rightarrow 0$ ($n \rightarrow \infty$)

この時, $E \in \delta$ だから, $E \in \sigma(X_{n+1}, X_{n+2}, \dots)$ である. つまり, E と E_n は独立であることがわかる.

$P(E \cap E_n) = P(E)P(E_n)$ であり.

各辺で $n \rightarrow \infty$ とすれば, $P(E) = P(E)^2$ であるから, $P(E) = 0, 1$ となることがわかった. \square

定義 4. *infinite often*

$\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{F}$ とする. $\{A_n \text{ i.o.}\}$ を $\{A_n \text{ i.o.}\} = \lim_{m \rightarrow \infty} \bigcup_{n > m} A_n$ と定める.

$\{A_n \text{ i.o.}\}$ は $\{\omega \mid \omega \in A_n \text{ となる } n \text{ が無限個存在する.}\}$ とかける.

$\because \omega \in \lim_{m \rightarrow \infty} \bigcup_{n > m} A_n$ を任意にとる. 1 に対して $\omega \in A_{n_1}$ となる $n_1 \in \mathbb{N}$ をとる. 続いて n_1 に対して $\omega \in A_{n_2}$ となる $n_2 \in \mathbb{N}$ をとる. これを続ければ $\omega \in A_n$ となる n の列として $\{n_k\}_{k \in \mathbb{N}}$ が取れるので, $\omega \in \{\omega' \mid \omega' \in A_n \text{ となる } n \text{ が無限個存在する.}\}$ である.

$\omega \in \{\omega \mid \omega \in A_n \text{ となる } n \text{ が無限個存在する.}\}$ を任意にとる. このとき任意の $m \in \mathbb{N}$ に対して

$\omega \in A_n$ となる $n > m$ が無限個存在する. よって $\omega \in \lim_{m \rightarrow \infty} \bigcup_{n > m} A_n$

補題 5. *Borel-Cantelli Lemma*

(I), $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}} \in \mathcal{F}$ について, $\sum_{n=1}^{\infty} P(A_n) < \infty$ ならば, $P(A_n \text{ i.o.}) = 0$ が成立する.

(II), $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}} \in \mathcal{F}$ について, $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ が独立かつ, $\sum_{n=1}^{\infty} P(A_n) = \infty$ ならば, $P(A_n \text{ i.o.}) = 1$ が成立する.

Proof.

(I)

$P(A_n \text{ i.o.}) = P(\lim_{m \rightarrow \infty} \bigcup_{n=m}^{\infty} A_n) = \lim_{m \rightarrow \infty} P(\bigcup_{n=m}^{\infty} A_n) \leq \lim_{m \rightarrow \infty} (\sum_{n=m}^{\infty} P(A_n))$ (\because 二つ目の等号は測度の連続性, 不等号には劣加法性を使った)

$\sum_{n=1}^{\infty} P(A_n) < \infty$ であるから $\lim_{m \rightarrow \infty} (\sum_{n=m}^{\infty} P(A_n)) = 0 \therefore P(A_n \text{ i.o.}) = 0$

(II)

$\forall m \in \mathbb{N}$ に対して, $P(\bigcap_{n=m}^{\infty} A_n^c) = 0$ を示せば, $P((A_n \text{ i.o.})^c) = P(\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n=m}^{\infty} A_n^c) = \lim_{m \rightarrow \infty} P(\bigcap_{n=m}^{\infty} A_n^c) = 0$, つまり $P(A_n \text{ i.o.}) = 1$ がわかる.

$\forall m \in \mathbb{N}$ を固定する. $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ は独立なので $P(\bigcap_{n=m}^{\infty} A_n^c) = \prod_{n=m}^{\infty} P(A_n^c) = \prod_{n=m}^{\infty} (1 - P(A_n))$ である

. ここで $\log(1-x) \leq -x$ ($0 \leq x \leq 1$) を使うと, $\log(\prod_{n=m}^{\infty} (1 - P(A_n))) = \sum_{n=m}^{\infty} \log(1 - P(A_n)) \leq$

$-\sum_{n=m}^{\infty} P(A_n) = -\infty$. よって $P(\bigcap_{n=m}^{\infty} A_n^c) = 0$ ($\forall m \in \mathbb{N}$) が示せた. \square

いくつか応用例を挙げる.

(例 1) コイントスを考える. s を長さ k の H, T (表, 裏) が要素の列とする. $A_n = \{\omega; (\omega_n, \dots, \omega_{n+k-1}) = s\}$ と定める.

命題 6. $P(A_n \text{ i.o.}) = 1$

Proof. $B_1 = \{\omega; (\omega_1, \dots, \omega_k) = s\}$, $B_2 = \{\omega; (\omega_{k+1}, \dots, \omega_{2k}) = s\}$, ... とおく. このとき, $\{B_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ は独立となる. また, $\{B_n \text{ i.o.}\} \subset \{A_n \text{ i.o.}\}$ である ($\because B_l = A_{(l-1)k+1}$). $P(B_n) = P(B_1) = \frac{1}{2^k} > 0$ なので

$\sum_{n=1}^{\infty} P(B_n) = \infty$. 以上のことから補題 5(II) を使うと, $P(B_n \text{ i.o.}) = 1 \leq P(A_n \text{ i.o.}) \therefore P(A_n \text{ i.o.}) = 1$ \square

(例 2) 再び, コイントスを考える. $Y_i(\omega) = \begin{cases} 1 & (\omega_i \text{ が } H \text{ のとき}) \\ -1 & (\omega_i \text{ が } T \text{ のとき}) \end{cases}$, $Z_n = Y_1 + \dots + Y_n$ と定める.

命題 7. $P(\text{Head}) \neq \frac{1}{2}$ とする. このとき $P(Z_n = 0 \text{ i.o.}) = 0$ となる.

Proof.

$P(\text{Head}) = p$ とおく.

$\sum_{n=1}^{\infty} P(Z_n = 0) < \infty$ であることが示せれば, 補題 5(I) から $P(Z_n = 0 \text{ i.o.}) = 0$ がわかる. Stirling の近似公式から, 十分大きい n に対して, ${}_2C_n = 2^{2n} \frac{1+\delta_n}{\sqrt{\pi n}}$ (ただし $\delta_n \downarrow 0$) であり, また, $p \neq \frac{1}{2}$ なので $2^2 p(1-p) < 1$ より, ある $0 < \lambda < 1$ が存在して $2^2 p(1-p) < \frac{1}{\lambda} 2^2 p(1-p) < 1$ となる. $\delta_n \downarrow 0$ だから十分大きい n に対しては $\delta_n < \frac{\lambda}{2^2 p(1-p)} - 1$ が成立する.

以上で $N \in \mathbb{N}$ を, $n \geq N$ で $P(Z_{2n}) = {}_2C_n p^n (1-p)^n = 2^{2n} \frac{1+\delta_n}{\sqrt{\pi n}} p^n (1-p)^n$ かつ $\delta_n < \frac{\lambda}{2^2 p(1-p)} - 1$ を満たすようにとる. $a_n = 2^{2n} \frac{1+\delta_n}{\sqrt{\pi n}} p^n (1-p)^n$ とおく. $n \geq N$ において $\frac{a_{n+1}}{a_n} = 2^2 \frac{1+\delta_{n+1}}{1+\delta_n} \sqrt{\frac{n}{n+1}}$
 $p(1-p) \leq 2^2 \sqrt{\frac{n}{n+1}} \frac{\lambda}{2^2 p(1-p)} p(1-p) = \lambda \sqrt{\frac{n}{n+1}} \leq \lambda$ だから, $a_{n+1} \leq (1-\lambda)a_n \leq \dots \leq (1-\lambda)^{n+1-N} a_N$

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} P(Z_{2n} = 0) &= \sum_{n=1}^N P(Z_{2n} = 0) + \sum_{n=N+1}^{\infty} P(Z_{2n} = 0) \leq \sum_{n=1}^N P(Z_{2n} = 0) + \sum_{n=N+1}^{\infty} \lambda^{n-N} a_N \\ &\leq \sum_{n=1}^N P(Z_{2n} = 0) + a_N \sum_{n=1}^{\infty} \lambda^n = \sum_{n=1}^N P(Z_{2n} = 0) + a_N \frac{\lambda}{1-\lambda} < \infty \quad (\because 0 < \lambda < 1) \end{aligned}$$

以上で $\sum_{n=1}^{\infty} P(Z_n = 0) = \sum_{n=1}^{\infty} P(Z_{2n} = 0) < \infty$ がわかった. □

定理 8. $P(\text{Head}) = \frac{1}{2}$ とする. このとき $P(Z_n = 0 \text{ i.o.}) = 1$ となる.

Proof.

$n_1 < n_2 < \dots$ の自然数列とする. また, 各 $k \in \mathbb{N}$ に対して, $n_k < m_k < n_{k+1}$ となるように $m_1 < m_2 < \dots$ をとる. $C_k = \{Y_{n_k+1} + \dots + Y_{m_k} \leq -n_k\} \cap \{Y_{m_k+1} + \dots + Y_{n_{k+1}} \geq m_k\}$ と定める.

$Y_i = -1, 1$ だから $-n \leq Z_n \leq n$ となることを使うと, $\omega \in C_k$ に対して, $Z_{m_k}(\omega) = (Y_1 + \dots + Y_{m_k})(\omega) = (Y_1 + \dots + Y_{n_k})(\omega) + (Y_{n_k+1} + \dots + Y_{m_k})(\omega) \leq n_k - n_k = 0$

また $Z_{n_{k+1}}(\omega) = (Y_1 + \dots + Y_{m_k})(\omega) + (Y_{m_k+1} + \dots + Y_{n_{k+1}})(\omega) \geq -m_k + m_k = 0$ よって,
 $\omega \in C_k$ に対して $Z_{m_k}(\omega) \leq 0, Z_{n_{k+1}}(\omega) \geq 0$ であり, $Z_{n+1} = Z_n \pm 1$ となることから

$$C_k \subset \{Z_n = 0; n_k + 1 \leq n \leq n_{k+1}\} = \bigcup_{n=n_k+1}^{n_{k+1}} \{Z_n = 0\}$$

$$\{C_n \text{ i.o.}\} = \bigcap_{m=1}^{\infty} \bigcup_{k=m}^{\infty} C_k \subset \bigcap_{m=1}^{\infty} \bigcup_{k=m}^{\infty} \bigcup_{n=n_k+1}^{n_{k+1}} \{Z_n = 0\} \subset \bigcap_{m=1}^{\infty} \bigcup_{n=n_m+1}^{\infty} \{Z_n = 0\} = \{Z_n = 0 \text{ i.o.}\}$$

Borel-Cantelli Lemma から $\sum_{n=1}^{\infty} P(C_n) = \infty$ となれば $1 = P(C_n \text{ i.o.}) \leq P(Z_n = 0 \text{ i.o.})$ となる. つまり

$\sum_{n=1}^{\infty} P(C_n) = \infty$ となるような自然数列 $\{n_k\}, \{m_k\}$ が取れることを示せばよい.

• $\forall \alpha \in (0, 1), \forall k \in \mathbb{N}$ に対して, $\exists \varphi(k) \geq 1$ s.t. $P(|Z_{\varphi(k)}| < k) \leq \alpha$ となる.

(proof) $\forall \alpha \in (0, 1), \forall k \in \mathbb{N}, \forall j \in \mathbb{Z}$ を固定する, $P(Z_n = j) \rightarrow 0$ ($n \rightarrow \infty$) であるから, $\sum_{|j| < k} P(Z_n = j) \rightarrow 0$ ($n \rightarrow \infty$) となる. よって, $\varphi(k)$ を $\sum_{|j| < k} P(Z_{\varphi(k)} = j) \leq \alpha$ となるように取れる. [証明終了]

$\forall \alpha \in (0, 1), \forall k \in \mathbb{N}$ を固定する. $\{\varphi(k)\}_{k \in \mathbb{N}}$ を上で示したものと同様に取る. n_k, m_k を $n_1 = 1, m_k = n_k + \varphi(n_k), n_{k+1} = m_k + \varphi(m_k)$ とする.

$P(C_k) = P(Y_{n_k+1} + \dots + Y_{m_k} \leq -n_k)P(Y_{m_k+1} + \dots + Y_{n_{k+1}} \geq m_k)$ ($\because \{Y_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ は独立)

$P(\text{Head}) = \frac{1}{2}$ であるから, 対象性を使うと

$P(|Y_{n_k+1} + \dots + Y_{m_k}| \geq n_k) = 2P(Y_{n_k+1} + \dots + Y_{m_k} \leq -n_k)$

$P(|Y_{m_k+1} + \dots + Y_{n_{k+1}}| \geq m_k) = 2P(Y_{m_k+1} + \dots + Y_{n_{k+1}} \geq m_k)$ となるから,

$P(C_k) = \frac{1}{4}P(|Y_{n_k+1} + \dots + Y_{m_k}| \geq n_k)P(|Y_{m_k+1} + \dots + Y_{n_{k+1}}| \geq m_k), \{Y_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ の同一分布性から

$= \frac{1}{4}P(|Y_1 + \dots + Y_{m_k - n_k}| \geq n_k)P(|Y_1 + \dots + Y_{n_{k+1} - m_k}| \geq m_k), \varphi(k)$ の定め方から,

$= \frac{1}{4}P(|Y_1 + \dots + Y_{\varphi(n_k)}| \geq n_k)P(|Y_1 + \dots + Y_{\varphi(m_k)}| \geq m_k) \geq \frac{1}{4}(1 - \alpha)^2$

$\because \sum_{|j| < k} P(Z_{\varphi(k)} = j) \underbrace{=}_{\{Z_{\varphi(k)} = j\}_{|j| < k} \text{ は非交和}} P(\bigcup_{|j| < k} Z_{\varphi(k)} = j) = P(|Y_1 + \dots + Y_{\varphi(k)}| < k) \leq \alpha$ なので

$P(|Y_1 + \dots + Y_{\varphi(k)}| \geq k) \geq 1 - \alpha$

以上で $\sum_{k=1}^{\infty} P(C_k) \geq \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{4}(1 - \alpha)^2 = \infty$ となつて, $P(Z_n = 0 \text{ i.o.}) = 1$ が示せた. \square

2 独立確率変数に対する大数の法則

定理 9. X_1, X_2, \dots を独立確率変数とする.

このとき,

$\sum_{k=1}^n X_k$ が確率収束する $\Leftrightarrow \sum_{k=1}^n X_k$ が概収束する が成立する.

まず、補題を示す.

補題 10. $N \in \mathbb{N}$ を固定する. X_1, X_2, \dots, X_N を独立確率変数とし, $S_n = X_1 + \dots + X_n$ とおく.

$\forall \alpha > 0$ に対して, $\sup_{1 \leq j \leq N} P(|S_N - S_j| > \alpha) = c < 1$ となるとき,

$P(\sup_{1 \leq j \leq N} |S_j| > 2\alpha) \leq \frac{1}{1-c} P(|S_N| > \alpha)$ となる.

Proof.

$j^*(\omega)$ を $|S_j(\omega)| > 2\alpha$ となる $1 \leq j \leq N$ で一番小さいものとする. 存在しないときは 0 とする. ここで

$\bigcup_{1 \leq j \leq N} \{j^* = j\} = \emptyset$ であるとき $P(\sup_{1 \leq j \leq N} |S_j| > 2\alpha) = 0$ なので, $P(\sup_{1 \leq j \leq N} |S_j| > 2\alpha) = 0 \leq \frac{1}{1-c} P(|S_N| > \alpha)$

α が成立する. よって, $\bigcup_{1 \leq j \leq N} \{j^* = j\} \neq \emptyset$ のときを考える.

$P(|S_N| > \alpha, \sup_{1 \leq j \leq N} |S_j| > 2\alpha) = \sum_{j=1}^N P(|S_N| > \alpha, j^* = j) \geq \sum_{j=1}^N P(|S_N - S_j| \leq \alpha, j^* = j)$

$\therefore \bullet \bigcup_{1 \leq j \leq N} \{j^* = j\} = \left\{ \sup_{1 \leq j \leq N} |S_j| > 2\alpha \right\}$ を示せば、一つ目の等号が成立する。

(C)

$\omega \in (\text{左辺})$ とすれば、 $1 \leq \exists j \leq N$ s.t. $j^*(\omega) = k$ だから $|S_k(\omega)| > 2\alpha$ なので $\sup_{1 \leq j \leq N} |S_j| \geq |S_k(\omega)| > 2\alpha$ となって、 $\omega \in (\text{右辺})$

(D)

$\omega \in (\text{右辺})$ とすれば、 $\sup_{1 \leq j \leq N} |S_j(\omega)| > 2\alpha$ であるから、 $\exists \{k_1, k_2, \dots, k_K\} \subset \{1, 2, \dots, N\}$ s.t. $|S_{k_m}| > 2\alpha$ ($m = 1, 2, \dots, K$) となる。 $j^{**}(\omega) = \min \{k_1, k_2, \dots, k_K\}$ とすれば $j^*(\omega) = j^{**}(\omega)$ となるから、 $\omega \in (\text{左辺})$ となる。

• 各 $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ に対して、 $\{|S_N| > \alpha\} \cap \{j^* = j\} \supset \{|S_N - S_j| \leq \alpha\} \cap \{j^* = j\}$ となるのを示せば 2 つ目の不等号が示せる。

$k \in \{1, 2, \dots, N\}$ を固定しておく。 $\omega \in (\text{右辺})$ をとる。 $|S_N(\omega) - S_j(\omega)| \leq \alpha$ かつ $j^*(\omega) = j$ であるから、
 $|S_j(\omega)| - |S_N(\omega)| \leq \alpha$ かつ $|S_j(\omega)| > 2\alpha \Leftrightarrow |S_j(\omega)| - \alpha \leq |S_N(\omega)|$ かつ $|S_j(\omega)| > 2\alpha$
 $\Rightarrow 2\alpha - \alpha = \alpha < |S_N(\omega)|$

以上で $\{|S_N| > \alpha\} \cap \{j^* = j\} \supset \{|S_N - S_j| \leq \alpha\} \cap \{j^* = j\}$

$\{j^* = j\} = \left(\bigcap_{k=1}^{j-1} \{|S_k| > 2\alpha\}^c \right) \cap \{|S_j| > 2\alpha\}$ なので、 $\{j^* = j\} \in \sigma(X_1, \dots, X_j)$,

$\{|S_N - S_j| \leq \alpha\} \in \sigma(X_{j+1}, \dots, X_N)$ であるから、 $\{j^* = j\}$ と $\{|S_N - S_j| \leq \alpha\}$ は独立。 仮定から $P(|S_N - S_j| > \alpha) \leq c$ なので $1 - P(|S_N - S_j| > \alpha) = P(|S_N - S_j| \leq \alpha) \geq 1 - c$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N P(|S_N - S_j| \leq \alpha, j^* = j) &= \sum_{j=1}^N P(|S_N - S_j| \leq \alpha) P(j^* = j) \geq (1 - c) \sum_{j=1}^N P(j^* = j) \\ &= (1 - c) P\left(\sup_{1 \leq j \leq N} |S_j| > 2\alpha\right) \end{aligned}$$

$$(1 - c) P\left(\sup_{1 \leq j \leq N} |S_j| > 2\alpha\right) \leq \sum_{j=1}^N P(|S_N - S_j| \leq \alpha, j^* = j) \leq P(|S_N| > \alpha, \sup_{1 \leq j \leq N} |S_j| > 2\alpha)$$

$$\leq P(|S_N| > \alpha) \quad \therefore P\left(\sup_{1 \leq j \leq N} |S_j| > 2\alpha\right) \leq \frac{1}{1 - c} P(|S_N| > \alpha) \quad \square$$

補題 10 を使って、定理 9 の証明をする。

Proof.

(\Leftarrow) 概収束するならば確率収束するので成立する。

(\Rightarrow) $\sum_{k=1}^n X_k$ は確率収束するとする。ここで $\sum_{k=1}^n X_k$ が概収束しないと仮定する。(背理法)

ここで実数列 $\{s_n\}$ が収束しないとすれば $\{s_n\}$ は Cauchy 列でないので

$\exists \varepsilon > 0$ s.t. $\forall N \in \mathbb{N}, \forall n, m \geq N \wedge |s_n - s_m| > \varepsilon$ であるから、

$\exists \varepsilon > 0$ s.t. $\forall m \in \mathbb{N}, \sup_{n > m} |s_n - s_m| > \varepsilon$ となる。 $\sum_{k=1}^n X_k$ はほとんど確実に Cauchy 列でないから、

$\exists \varepsilon > 0, \exists \delta \in (0, 1]$ s.t. $\left[\forall m \in \mathbb{N}, P\left(\sup_{n > m} \left| \sum_{k=1}^n X_k - \sum_{k=1}^m X_k \right| > \varepsilon\right) \geq \delta \right]$ となる。この ε, δ を固定する。

$\sum_{k=1}^n X_k$ は確率収束するので $\sum_{k=1}^N X_k - \sum_{k=1}^m X_k \xrightarrow{P} 0$ となる。

$$\begin{aligned}
& \because \sum_{k=1}^n X_k \xrightarrow{P} s \text{ とすると, } P\left(\left|\sum_{k=1}^N X_k - \sum_{k=1}^m X_k\right| > \varepsilon\right) = P\left(\left|\sum_{k=1}^N X_k - s + s - \sum_{k=1}^m X_k\right| > \varepsilon\right) \leq \\
& P\left(\left|\sum_{k=1}^N X_k - s\right| + \left|s - \sum_{k=1}^m X_k\right| > \varepsilon\right) \leq P\left(\left\{\left|\sum_{k=1}^N X_k - s\right| > \frac{\varepsilon}{2}\right\} \cup \left\{\left|s - \sum_{k=1}^m X_k\right| > \frac{\varepsilon}{2}\right\}\right) \\
& \leq P\left(\left|\sum_{k=1}^N X_k - s\right| > \frac{\varepsilon}{2}\right) + P\left(\left|\sum_{k=1}^m X_k - s\right| > \frac{\varepsilon}{2}\right) \rightarrow 0 \ (m, N \rightarrow \infty) \text{ となるから.}
\end{aligned}$$

よって, ある $M \in \mathbb{N}$ が存在して, $\forall m, N \geq M \ (m < N)$ に対して, $P\left(\left|\sum_{k=m+1}^N X_k\right| > \frac{\varepsilon}{2}\right) < 1$ で,
 $P\left(\left|\sum_{k=m+1}^N X_k\right| > \frac{\varepsilon}{2}\right) \rightarrow 0 \ (m, N \rightarrow \infty)$ この m, N を固定する.

$$C_{m,N} = \sup_{m < n \leq N} P\left(\left|\sum_{k=n}^N X_k\right| > \frac{\varepsilon}{2}\right) \text{ とおくと, } C_{m,N} < 1 \text{ かつ } C_{m,N} \rightarrow 0 \ (m, N \rightarrow \infty) \text{ となる.}$$

ここで補題 8 を使うと,

$$P\left(\sup_{m < n \leq N} \left|\sum_{k=m+1}^n X_k\right| > \varepsilon\right) \leq \frac{1}{1 - C_{m,N}} P\left(\left|\sum_{k=m+1}^N X_k\right| > \frac{\varepsilon}{2}\right) \text{ とかけて, まず } N \rightarrow \infty \text{ とすると,}$$

$$\text{単調性から, } \lim_{N \rightarrow \infty} P\left(\sup_{m < n \leq N} \left|\sum_{k=m+1}^n X_k\right| > \varepsilon\right) = P\left(\lim_{N \rightarrow \infty} \sup_{m < n \leq N} \left|\sum_{k=m+1}^n X_k\right| > \varepsilon\right) = P\left(\sup_{m < n} \left|\sum_{k=m+1}^n X_k\right| > \varepsilon\right)$$

$$\leq \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{1 - C_{m,N}} P\left(\left|\sum_{k=m+1}^N X_k\right| > \frac{\varepsilon}{2}\right), \lim_{m \rightarrow \infty} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{1 - C_{m,N}} P\left(\left|\sum_{k=m+1}^N X_k\right| > \frac{\varepsilon}{2}\right) \text{ だから,}$$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} P\left(\sup_{m < n} \left|\sum_{k=m+1}^n X_k\right| > \varepsilon\right) = 0 \text{ これは } \forall m \in \mathbb{N}, P\left(\sup_{n > m} \left|\sum_{k=1}^n X_k - \sum_{k=1}^m X_k\right| > \varepsilon\right) \geq \delta > 0 \text{ に矛盾す}$$

る. 背理法により $\sum_{k=1}^n X_k$ は概収束することがわかった. □

系 11.

$E[X_k] = 0 \ (\forall k \in \mathbb{N}), \sum_{k=1}^{\infty} E[X_k^2] < \infty$ とする. このとき $\sum_{k=1}^n X_k$ は概収束する.

Proof.

X_1, X_2, \dots は独立なので, $\sum_{k=1}^n X_k$ が確率収束することを示せば定理 9 から $\sum_{k=1}^n X_k$ は概収束する.

$\sum_{k=1}^{\infty} E[X_k^2] = s^2$ (ただし $s \geq 0$) とする. $\forall \varepsilon > 0$ に対して Chebyshev の不等式から

$$P\left(\left|\sum_{k=1}^n X_k - s\right| > \varepsilon\right) \leq \frac{1}{\varepsilon^2} E\left[\left|\sum_{k=1}^n X_k - s\right|^2\right] \text{ となる. } E\left[\left|\sum_{k=1}^n X_k - s\right|^2\right] \rightarrow 0 \ (n \rightarrow \infty) \text{ を示したい.}$$

$$E\left[\left|\sum_{k=1}^n X_k - s\right|^2\right] = E\left[\left|\sum_{k=1}^n X_k\right|^2\right] - 2sE\left[\sum_{k=1}^n X_k\right] + s^2$$

$$= E\left[\sum_{k=1}^n X_k^2 + 2\sum_{i < j} X_i X_j\right] - 2sE\left[\sum_{k=1}^n X_k\right] + s^2 \text{ ここで, } X_1, X_2, \dots \text{ は独立だから}$$

$$\sum_{i < j} E[X_i X_j] = \sum_{i < j} E[X_i] E[X_j] \text{ が成立する. また } E[X_k] = 0 \ (\forall k \in \mathbb{N}) \text{ なので}$$

$$= \sum_{k=1}^n E[X_k^2] - 2s \sum_{k=1}^n E[X_k] + s^2 \rightarrow s^2 - 2s^2 + s^2 = 0 \quad (n \rightarrow \infty)$$

$\sum_{k=1}^n X_k$ が確率収束することがわかったので $\sum_{k=1}^n X_k$ は概収束する. □

定理 12. 独立確率変数に対する大数の法則

X_1, X_2, \dots を独立確率変数とする. $E[X_k] = 0$, $E[X_k^2] < \infty$ ($\forall k \in \mathbb{N}$) であるとする. 正数列 $\{b_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ が $b_n \uparrow \infty$ かつ $\sum_{k=1}^{\infty} E\left[\frac{X_k^2}{b_k^2}\right] < \infty$ を満たすとき, $\frac{X_1 + \dots + X_n}{b_n} \xrightarrow{a.s.} 0$ が成立する.

証明の前に一つ補題を示す.

補題 13. *Kronecker's Lemma*

x_1, x_2, \dots を $\sum_{k=1}^n x_k \rightarrow s < \infty$ を満たす実数列とする. このとき, $b_n \uparrow \infty$ となる整数列 $\{b_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ が取れて,

$$\frac{1}{b_n} \sum_{k=1}^n b_k x_k \rightarrow 0 \text{ となる.}$$

Proof.

$$r_n = \sum_{k=n+1}^{\infty} x_k, \quad r_0 = s \text{ とおく. このとき } x_n = r_{n-1} - r_n, \quad n = 1, 2, \dots \text{ また, } \sum_{k=1}^n b_k x_k =$$

$$\sum_{k=1}^n b_k (r_{k-1} - r_k) = \sum_{k=0}^{n-1} b_{k+1} r_k - \sum_{k=1}^n b_k r_k = \sum_{k=1}^{n-1} (b_{k+1} - b_k) r_k + b_1 s - b_n r_n \text{ となるから}$$

$$\left| \sum_{k=1}^n b_k x_k \right| \leq \sum_{k=1}^{n-1} (b_{k+1} - b_k) |r_k| + b_1 |s| + b_n |r_n| \quad (\because \text{三角不等式, } b_n \text{ は単調増加なので } b_{n+1} - b_n \geq 0)$$

ここで $\forall \varepsilon > 0$ をとる. $\sum_{k=1}^{\infty} x_k$ は収束するから r_k の定め方から $N \in \mathbb{N}$ を $\forall n \geq N$ に対して, $|r_k| \leq \varepsilon$ となるように取れる. この N を固定する. $\tilde{r} := \max\{|r_1|, \dots, |r_{N-1}|, \varepsilon\}$ とする. $n > N$ において,

$$\sum_{k=1}^{n-1} (b_{k+1} - b_k) |r_k| \leq \sum_{k=1}^{N-1} (b_{k+1} - b_k) |r_k| + \varepsilon \sum_{k=N}^{n-1} (b_{k+1} - b_k) \leq \tilde{r}(b_N - b_1) + \varepsilon(b_n - b_N) \text{ よって}$$

$$\left| \frac{\sum_{k=1}^n b_k x_k}{b_n} \right| \leq \frac{1}{b_n} (\tilde{r}(b_N - b_1) + \varepsilon(b_n - b_N) + b_1 |s| + b_n \varepsilon) \rightarrow \varepsilon \text{ つまり } \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\sum_{k=1}^n b_k x_k}{b_n} \right| \leq \varepsilon \text{ となるから}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\sum_{k=1}^n b_k x_k}{b_n} \right| \leq \varepsilon \text{ がわかった. ここで } \varepsilon \downarrow 0 \text{ とすれば, } \frac{1}{b_n} \sum_{k=1}^n b_k x_k \rightarrow 0 \text{ が示された.} \quad \square$$

この補題を使って定理 12 を証明する.

Proof.

Kronecker's Lemma により, $\sum_{k=1}^n \frac{X_k}{b_k}$ がほとんど確実に収束すれば, $\frac{1}{b_k} \sum_{k=1}^n b_k \frac{X_k}{b_k} = \frac{1}{b_k} \sum_{k=1}^n X_k \xrightarrow{a.s.} 0$ となる.

仮定から, X_1, X_2, \dots は独立確率変数, $E\left[\frac{X_k}{b_k}\right] = 0$, $\sum_{k=1}^{\infty} E\left[\frac{X_k^2}{b_k^2}\right] < \infty$ であるから, 系 9 から $\sum_{k=1}^n \frac{X_k}{b_k}$ は概

収束する. $\therefore \frac{X_1 + \dots + X_n}{b_n} \xrightarrow{a.s.} 0$ □

3 再帰状態と格子状に分布する確率変数

以下では X_1, X_2, \dots を独立同一分布に従う確率変数列とする. $S_n = \sum_{k=1}^n X_k$ と定める.

定義 14. 再帰状態 (recurrent state)

$x \in \mathbb{R}$ とする. x が再帰状態 (recurrent state) であるとは, x の任意の開近傍 I に対して $P(S_n \in I \text{ i.o.}) = 1$ となることである.

定義 15. 格子状に分布する確率変数

X が格子 $L_d = \{nd \mid n \in \mathbb{Z}\}$, ($d > 0$) 上に分布するとは, $\sum_{n \in \mathbb{Z}} P(X = nd) = 1$ かつ

$\exists l > d \text{ s.t. } \sum_{n \in \mathbb{Z}} P(X = nl) = 1$ とならないことである.

X が格子状に分布しないとき, $L_0 = \mathbb{R}$ とかいて, X は L_0 上に分布するという.

定理 16. X_1, X_2, \dots を L_d ($d \geq 0$) 上に分布する確率変数列とする.

このとき L_d に含まれる状態は全て再帰的または全て非再帰的である.

Proof.

$G = \{x \in L_d \mid x \text{ は再帰的}\}$ とおくと, G は閉集合となる. (G が空のときは全ての状態が非再帰的なので $G \neq \emptyset$ とする.)

$\therefore \forall \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset G$ をとって $x_n \rightarrow x$ とする. このとき $x \in G$ を示したい.

x の開近傍 I を任意にとる. I に対して n を十分大きく取れば $x_n \in I$ となる. この n を固定する. I は x_n の近傍でもあるから, $P(S_n \in I \text{ i.o.}) = 1 \therefore x \in G$

$y \in \mathbb{R}$ が y の任意の開近傍 I に対して $k \in \mathbb{N}$ が存在して $P(S_k \in I) > 0$ となるとき y は候補状態であるとする.

x が再帰的かつ y が候補状態 $\Rightarrow x - y$ は再帰的である.

$\forall \varepsilon > 0$ をとって, $k \in \mathbb{N}$ を $P(|S_k - y| < \varepsilon) > 0$ を満たすようにとる.

x は再帰的より $P(\bigcap_{m \in \mathbb{N}} \bigcup_{n > m} \{|S_n - x| < \varepsilon\}) = 1$ となるから,

$$\begin{aligned} 0 &= P(\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_n - x| \geq \varepsilon\}) \geq P(|S_k - y| < \varepsilon, \bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_{k+n} - S_k - (x - y)| \geq 2\varepsilon\}) \\ &= P(|S_k - y| < \varepsilon) P(\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_{k+n} - S_k - (x - y)| \geq 2\varepsilon\}) = P(|S_k - y| < \varepsilon) P(\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_n - (x - y)| \geq 2\varepsilon\}) \\ &\therefore \forall \omega \in \{|S_k - y| < \varepsilon\} \cap \bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_{k+n} - S_k - (x - y)| \geq 2\varepsilon\} \text{ をとると, } \exists m \in \mathbb{N} \text{ s.t.} \end{aligned}$$

$\forall n \geq m, |S_{k+n}(\omega) - S_k(\omega) - (x - y)| \geq 2\varepsilon$ となる. $2\varepsilon \leq |S_{k+n}(\omega) - x| + |S_k(\omega) - y| < |S_{k+n}(\omega) - x| + \varepsilon$ から $\varepsilon \leq |S_{k+n}(\omega) - x|$ ($\forall n \geq m$), $N = k + m$ とおけば,

$\forall n \geq N$ に対して, $|S_n(\omega) - x| \geq \varepsilon$ なので $\omega \in \bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_n - x| \geq \varepsilon\}$

$$\therefore \bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_n - x| \geq \varepsilon\} \supset \{|S_k - y| < \varepsilon\} \cap \bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_{k+n} - S_k - (x - y)| \geq 2\varepsilon\}$$

また X_1, X_2, \dots は独立なので, S_k と $S_{k+n} - S_k = \sum_{m=k+1}^{k+n} X_m$ は独立. また同一分布性から

$P(\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_{k+n} - S_k - (x-y)| \geq 2\varepsilon\}) = P(\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_n - (x-y)| \geq 2\varepsilon\})$ も成立する.

$P(|S_k - y| < \varepsilon) > 0$ なので $P(\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{|S_n - (x-y)| \geq 2\varepsilon\}) = 0$ つまり

$P(\{|S_n - (x-y)| < 2\varepsilon\} \text{ i.o.}) = 1$ $I_\varepsilon = (x-y-2\varepsilon, x-y+2\varepsilon)$ とおけば, $P(|S_n| \in I_\varepsilon \text{ i.o.}) = 1$

$\varepsilon > 0$ は任意だったから $x-y$ は再帰的である.

$x \in G$ は候補状態である $\because \forall x \in G$ をとる. x の開近傍 I を任意にとる. $P(S_n \in I \text{ i.o.}) = 1$ であるから, $\forall k \in \mathbb{N}$ に対して $P(S_k \in I) = 0$ であるとすれば $\sum_{k=1}^{\infty} P(S_k \in I) < \infty$ より Borel-Cantelli Lemma から $P(S_k \in I \text{ i.o.}) = 0$ これは $P(S_n \in I \text{ i.o.}) = 1$ に矛盾する. よって $\exists m \in \mathbb{N} \text{ s.t. } P(S_k \in I) > 0$ となる.

よって $x - x = 0 \in G$ である. このことから G は群である. G が \mathbb{R} 上で閉なので G は \mathbb{R} 上の閉部分群である. 全ての候補状態 y に対して $0 - y = y \in G$ となる.

• $d > 0$ のとき $P(X_1 = nd) > 0$ かつ $P(X_1 = (n+1)d) > 0$ となる $n \in \mathbb{Z}$ が存在しないとき

$0 \in G$ なので 0 は候補状態なので $\sum_{n \in \mathbb{Z}} P(X_1 = (2d)n) = 1$ となって, d の最大性に反する. よってある $n \in \mathbb{Z}$ が取れて $nd, (n+1)d \in G$ となる. G は群なので $(n+1)d - nd = d \in G$ このことから $L_d \subset G$ である.

• $d = 0$ のとき このとき G に対して $\exists l > 0 \text{ s.t. } G = \{nl | n \in \mathbb{Z}\}$ となると仮定する (背理法). 候補状態は G の元なので $\sum_{n \in \mathbb{Z}} P(X_1 = nl) = 1$ となり, これは $d = 0$ に矛盾する. よって $G = \mathbb{R} = L_0$

以上で $d \geq 0$ に対して $L_d = G$ となり, L_d の全ての状態は再帰的となる. □

定理 17. X_1, X_2, \dots を L_d 上に分布する確率変数列とする (ただし $d \geq 0$).

(i) もし, 有界区間 $J \subset \mathbb{R}$ が存在して $J \cap L_d \neq \emptyset$ かつ $\sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in J) < \infty$ を満たせば, 再帰状態は存在しない.

(ii) もし, 有界区間 $J \subset \mathbb{R}$ で $0 < \forall \varepsilon < \frac{\|J\|}{2}$ に対して, $\exists x \in \mathbb{R} \text{ s.t. } I = (x - \varepsilon, x + \varepsilon) \subset J$ かつ $\sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in I) = \infty$ となるものが存在すれば, L_d の全ての状態は再帰状態である.

Proof.

(i) $J \cap L_d \neq \emptyset$ かつ $\sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in J) < \infty$ を満たす有界区間 $J \subset \mathbb{R}$ がとれたとする. Borel-Cantelli's Lemma から $P(S_n \in J \text{ i.o.}) = 0$ となって, L_d は少なくとも再帰的でない状態が含まれる.

$\because x \in L_d \cap J$ をとれば, x の開近傍 $I \subset J$ がとれて, $P(S_n \in I \text{ i.o.}) \leq P(S_n \in J \text{ i.o.}) = 0$ となって x は再帰的でない L_d の元である.

定理 16 から L_d の元は全て再帰状態にはならない. つまり再帰状態は存在しない.

(ii) 長さ l の有界区間 $J \subset \mathbb{R}$ で $0 < \forall \varepsilon < \frac{l}{2}$ に対して, $\exists x \in \mathbb{R} \text{ s.t. } I = (x - \varepsilon, x + \varepsilon) \subset J$ かつ $\sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in I) = \infty$ となるものがとれたとする. $0 \in L_d$ なので, 0 が再帰的であることがわかれば

定理 16 から L_d の全ての状態が再帰的である. $A_k = \begin{cases} \{S_k \in I, S_{n+k} \notin I \mid n = 1, 2, \dots\} & (k \geq 1) \\ \{S_n \notin I \mid n = 1, 2, \dots\} & (k = 0) \end{cases}$

と定めると, $\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{S_n \notin I\} = \bigcup_{k=0}^{\infty} A_k$ となる.

$\because (\cdot)^{\forall} \omega \in (\text{左辺})$ とする. このとき $\exists m \in \mathbb{N}$ がとれて, $S_n(\omega) \notin I \ (\forall n > m)$ となる. $1 \leq i \leq m-1$ の中で

$S_i(\omega) \in I$ となるものが存在するときその最大値を k とすれば, $S_k(\omega) \in I, S_n(\omega) \notin I (\forall n \geq k)$ が成立する.
よって, $\omega \in A_k$ となる. $S_i \notin I (1 \leq i \leq m-1)$ のときは, $\omega \in \{S_n \notin I \mid n = 1, 2, \dots\} = A_0$ 以上で
 $\omega \in$ (右辺)

(\supset) $\forall \omega \in$ (右辺) とする. $\exists k \in \mathbb{N}$ s.t. $\omega \in A_k$ となる.

$$k \geq 1 \text{ のとき } \omega \in A_k \subset \{S_{n+k} \notin I \mid n = 1, 2, \dots\} = \bigcap_{n=k+1}^{\infty} \{S_n \notin I\}, \quad k = 0 \text{ のとき } \omega \in A_0 = \bigcap_{n=1}^{\infty} \{S_n \notin I\}$$

$$\text{定め方から } A_0, A_1, \dots \text{ は非交和なので, } P\left(\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{S_n \notin I\}\right) = P\left(\bigcup_{k=0}^{\infty} A_k\right) = \sum_{k=0}^{\infty} P(A_k)$$

$$k \geq 1 \text{ のとき, } P(A_k) \geq P(S_k \in I, |S_{n+k} - S_k| \geq 2\varepsilon, n = 1, 2, \dots)$$

$\because \omega \in \{S_k \in I\} \cap \{|S_{n+k} - S_k| \geq 2\varepsilon, n = 1, 2, \dots\}$ を任意にとる.

$$S_k(\omega) \in I \text{ かつ } (S_{n+k}(\omega) - S_k(\omega) \leq -2\varepsilon \text{ または } 2\varepsilon \leq S_{n+k}(\omega) - S_k(\omega), n = 1, 2, \dots)$$

I の定め方から, $x - \varepsilon < S_k < x + \varepsilon$ だから

$$\Rightarrow S_k(\omega) \in I \text{ かつ } (S_{n+k}(\omega) \leq (x + \varepsilon) - 2\varepsilon \text{ または } 2\varepsilon + (x - \varepsilon) \leq S_{n+k}(\omega), n = 1, 2, \dots)$$

$$\Leftrightarrow S_k(\omega) \in I \text{ かつ } (S_{n+k}(\omega) \leq x - \varepsilon \text{ または } x + \varepsilon \leq S_{n+k}(\omega), n = 1, 2, \dots)$$

$$\Leftrightarrow S_k(\omega) \in I \text{ かつ } (S_{n+k}(\omega) \notin I, n = 1, 2, \dots) \Leftrightarrow \omega \in A_k$$

$$P(S_k \in I, |S_{n+k} - S_k| \geq 2\varepsilon, n = 1, 2, \dots) = P(S_k \in I)P(|S_{n+k} - S_k| \geq 2\varepsilon, n = 1, 2, \dots) \quad \because \text{独立性}$$

$$= P(S_k \in I)P(|S_n| \geq 2\varepsilon, n = 1, 2, \dots) \quad \because \text{同一分布性}$$

$$P\left(\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{n > m} \{S_n \notin I\}\right) = \sum_{k=0}^{\infty} P(A_k) \geq P(A_0) + \sum_{k=1}^{\infty} P(A_k)$$

$$\geq P(A_0) + P(|S_n| \geq 2\varepsilon, n = 1, 2, \dots) \sum_{k=1}^{\infty} P(S_k \in I) \quad \text{ここで, } \sum_{k=1}^{\infty} P(S_k \in I) = \infty \text{ であるから}$$

$$P(|S_n| \geq 2\varepsilon, n = 1, 2, \dots) = 0. \text{ 以上で } 0 < \forall \varepsilon < \frac{l}{2}, P(|S_n| \geq 2\varepsilon, n = 1, 2, \dots) = 0 \text{ となる } (*)$$

$0 < \forall \varepsilon < \frac{l}{2}$ を新しく固定する. $I = (-\varepsilon, \varepsilon)$ として, $\{A_k\}_{k=0}^{\infty}$ を先と同様にとる. $I_\delta = (-\delta, \delta)$ (ただし, $\delta < \varepsilon$) とする. $\forall k \geq 1$ として $A_k = \lim_{\delta \uparrow \varepsilon} \{S_k \in I_\delta, S_{n+k} \notin I \mid n = 1, 2, \dots\}$ となるから

$$P(A_k) = P(\lim_{\delta \uparrow \varepsilon} \{S_k \in I_\delta, S_{n+k} \notin I \mid n = 1, 2, \dots\}) \text{ 連続性から}$$

$$= \lim_{\delta \uparrow \varepsilon} P(\{S_k \in I_\delta, S_{n+k} \notin I \mid n = 1, 2, \dots\})$$

$$P(S_k \in I_\delta, S_{n+k} \notin I \mid n = 1, 2, \dots) \leq P(S_k \in I_\delta, |S_{n+k} - S_k| \geq \varepsilon - \delta \mid n = 1, 2, \dots) \text{ となる.}$$

$\because \omega \in \{S_k \in I_\delta, S_{n+k} \notin I \mid n = 1, 2, \dots\}$ を任意のとる.

$$-\delta < S_k(\omega) < \delta, S_{n+k}(\omega) \leq -\varepsilon \text{ または } \varepsilon \leq S_{n+k}(\omega) \quad (n = 1, 2, \dots) \text{ となる.}$$

$$S_{n+k}(\omega) - S_k(\omega) \leq -\varepsilon - S_k(\omega) < -\varepsilon + \delta \text{ または } \varepsilon - \delta < \varepsilon - S_k(\omega) \leq S_{n+k}(\omega) - S_k(\omega)$$

$$\text{よって } |S_{n+k}(\omega) - S_k(\omega)| \geq \varepsilon - \delta \quad \therefore \omega \in \{S_k \in I_\delta, |S_{n+k} - S_k| \geq \varepsilon - \delta \mid n = 1, 2, \dots\}$$

独立性と同一分布性から

$$P(S_k \in I_\delta, |S_{n+k} - S_k| \geq \varepsilon - \delta \mid n = 1, 2, \dots) = P(S_k \in I_\delta)P(|S_{n+k} - S_k| \geq \varepsilon - \delta \mid n = 1, 2, \dots)$$

$$= P(S_k \in I_\delta)P(|S_n| \geq \varepsilon - \delta \mid n = 1, 2, \dots) = 0$$

$$\because 0 < \frac{\varepsilon - \delta}{2} < \frac{l}{2} \text{ なので } (*) \text{ より } P(|S_n| \geq \varepsilon - \delta \mid n = 1, 2, \dots) = 0$$

以上で $P(A_k) = 0 (\forall k \geq 1)$ となる.

$$0 < \varepsilon < \frac{l}{2} \text{ だから } 0 < \frac{\varepsilon}{2} < \frac{l}{2} \text{ なので } P(A_0) = P(S_n \notin I \mid n = 1, 2, \dots) = P(|S_n| \geq \varepsilon \mid n = 1, 2, \dots) = 0 \text{ これ}$$

までのことから $0 < \forall \varepsilon < \frac{l}{2}, I = (-\varepsilon, \varepsilon)$ に対して, $P(S_n \in I \text{ i.o.}) = 1$

よって, 0 は再帰的となる. $\therefore L_d$ の全ての状態は再帰的である. \square

系 18.

$\{S_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ に対して, 次の (i), (ii) のいずれかが成立する.

(i) $L_d \cap I \neq \emptyset$ を満たす全ての有界区間 I に対して, $P(S_n \in I \text{ i.o.}) = 1$

(ii) $L_d \cap I \neq \emptyset$ を満たす全ての有界区間 I に対して, $P(S_n \in I \text{ i.o.}) = 0$

Proof.

$L_d \cap I \neq \emptyset$ となる全ての有界区間 I に対して $\sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in I) = \infty$ となるとき, 定理 17 から L_d の全ての状態は再帰的である. つまり $L_d \cap I \neq \emptyset$ となる任意の有界区間 I とすれば, $\forall x \in L_d \cap I$ として $P(S_n \in I \text{ i.o.}) \geq P(S_n = x \text{ i.o.}) = 1$ ($\because x$ は再帰的) となる.

$L_d \cap I \neq \emptyset$ となる有界区間 I が存在して $\sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in I) < \infty$ となるとき, 定理 17 から再帰状態は存在しない. よって任意の有界区間 I ($L_d \cap I \neq \emptyset$) に対して I を含む開区間 J とすれば $P(S_n \in I \text{ i.o.}) \leq P(S_n \in J \text{ i.o.}) = 0$ ($\because J$ は L_d のある元の開近傍) \square

定義 19.

$\{S_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ が系 18 (i) を満たすとき, 再帰的という. また, 系 18 (ii) を満たすとき, 非再帰的という.

定理 20.

$E[X_1] = 0$ となるとき, S_1, S_2, \dots は再帰的となる.

証明の前にまず命題を一つ示す.

命題 21.

I が長さ a の区間であるとき, $\sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in I) \leq 1 + \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| \leq a)$ となる.

Proof.

I を長さ a の任意の区間としてとる. $N := \sum_{n=1}^{\infty} 1_{\{S_n \in I\}}$ とおくと, N は和 S_1, S_2, \dots の中で I に含まれるものを数えたものとなる.

$n^*(\omega) := \begin{cases} S_n(\omega) \in I \text{ となる最小の } n \in \mathbb{N} \\ \infty \end{cases}$ (もし $S_n(\omega) \notin I, n = 1, 2, \dots$) とおく.

$\{n^* = k\}$ 上では $1_{\{S_n \in I\}} = 0$ ($\forall n < k$), $1_{\{S_k \in I\}} = 1$ となるから,

$$\begin{aligned} N &= \sum_{n=1}^{k-1} 1_{\{S_n \in I\}} + 1_{\{S_k \in I\}} + \sum_{n=k+1}^{\infty} 1_{\{S_n \in I\}} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 1_{\{S_{k+n} \in I\}} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 1_{\{S_{k+n} - S_k \in I - S_k\}} \\ &\leq 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 1_{\{S_{k+n} - S_k \in [-a, a]\}} \end{aligned}$$

$\because \forall \omega \in \{n^* = k\}$ に対して, $I - S_k(\omega) \subset [-a, a]$ となる. つまり $1_{\{I - S_k(\omega)\}} \leq 1_{[-a, a]}$ が成立する.

なぜなら, $\bar{I} = [I_1, I_1 + a]$ とかくと ($I_1 \in \mathbb{R}$)

$-I_1 - a \leq -S_k(\omega) \leq -I_1$ であって, $I - I_1 - a = [-a, 0]$, $I - I_1 = [0, a]$ であるから,

$I - S_k(\omega) \subset [-a, a]$ だから, $1_{\{I - S_k\}} \leq 1_{[-a, a]}$ となる.

$\{n^* = k\} \in \sigma(X_1, X_2, \dots, X_k)$ なので, $\{n^* = k\}$ と $\{S_{k+n} - S_k \in [-a, a]\}$ は独立となる.

$$\begin{aligned}
& \int_{\{n^*=k\}} N(\omega)P(d\omega) \leq \int_{\{n^*=k\}} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} 1_{\{(S_{k+n}-S_k)(\omega) \in [-a, a]\}} \right) P(d\omega) \quad \text{単調収束定理から,} \\
& = P(n^*=k) + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{\{n^*=k\}} 1_{\{S_{k+n}(\omega)-S_k(\omega) \in [-a, a]\}} P(d\omega) = P(n^*=k) + \sum_{n=1}^{\infty} P(\{n^*=k\} \cap \{S_{k+n}-S_k \in [-a, a]\}) \\
& = P(n^*=k) + \sum_{n=1}^{\infty} P(n^*=k)P(S_{k+n}-S_k \in [-a, a]) \quad (\because \text{独立性から}) \quad \text{また同一分布性から} \\
& = P(n^*=k) + P(n^*=k) \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| \leq a) \quad \text{ここで両辺 } k \text{ で和をとると, 左辺は単調収束定理を使って,} \\
& \sum_{k=1}^{\infty} \int_{\{n^*=k\}} N(\omega)P(d\omega) = \int_{\Omega} \sum_{n=1}^{\infty} 1_{\{S_n(\omega) \in I\}} P(d\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in I) \quad \text{となつて,} \\
& \sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in I) \leq 1 + \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| \leq a) \quad \text{が成立する.} \quad \square
\end{aligned}$$

命題 21 を使って, 定理 20 を証明する.

Proof.

$$\begin{aligned}
& \forall M \in \mathbb{N} \text{ をとる. } \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| < M) = \sum_{k=-M}^{M-1} \sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in (k, k+1)) \quad \text{命題 21 より} \\
& \leq \sum_{k=-M}^{M-1} (1 + \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| \leq 1)) = 2M(1 + \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| \leq 1)) \quad \text{つまり} \\
& \overline{\lim}_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| < M) \leq 1 + \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| \leq 1) - (*) \\
& \text{大数の強法則から } \frac{S_n}{n} \xrightarrow{P} 0 \quad (\because \text{概収束} \Rightarrow \text{確率収束}) \quad \text{となる. } \forall \varepsilon > 0 \text{ をとる. このとき} \\
& \exists m \in \mathbb{N} \text{ s.t. } P(|S_n| < \varepsilon n) > \frac{1}{2} \quad (\forall n > m) \quad \text{となる. } M \in \mathbb{N} \text{ を } \varepsilon(m+1) < M \text{ となるようにとれば,} \\
& P(|S_n| < M) \geq P(|S_n| < \varepsilon(m+1)) > \frac{1}{2} \quad \text{となる.} \\
& \therefore \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| < M) \geq \sum_{n=m+1}^{\infty} P(|S_n| < M) > \frac{1}{2} \left(\frac{M}{\varepsilon} - m \right) \quad \text{から } \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| < M) \geq \frac{1}{4\varepsilon} - \frac{m}{4M} \\
& (*) \text{ から } 1 + \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| \leq 1) \geq \overline{\lim}_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| < M) \geq \frac{1}{4\varepsilon} \quad \text{となり, } \varepsilon \downarrow 0 \text{ とすれば,} \\
& \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| \leq 1) = \infty \quad \text{となる.} \quad \text{ここで } 0 < \forall \delta < \frac{1}{2} \text{ に対して, } \frac{1}{N} < \delta \text{ となる } N \in \mathbb{N} \text{ をとって,} \\
& \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| < M) = \sum_{k=-MN}^{N(M-1)} \sum_{n=1}^{\infty} P(S_n \in (\frac{k}{N}, \frac{k+1}{N})) \leq 2MN(1 + \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| \leq \frac{1}{N})) \quad \text{となつて,} \\
& 1 + \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| < \frac{1}{\delta}) \geq 1 + \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| \leq \frac{1}{N}) \geq \overline{\lim}_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| < M) \geq \frac{1}{4\varepsilon N} \rightarrow \infty \quad (\varepsilon \downarrow 0) \quad \text{だから,} \\
& \sum_{n=1}^{\infty} P(|S_n| < \frac{1}{\delta}) = \infty \quad \text{となる.} \quad \text{このことから, 定理 17(ii) より } L_d \text{ の全ての元は再帰的.} \\
& \text{系 18 から } \{S_n\}_n^{\infty} \text{ は再帰的となる.} \quad \square
\end{aligned}$$

例

コイントスを考える.

$$P(\text{Head}) = \frac{1}{2}, \quad Y_i(\omega) = \begin{cases} 1 & (\omega_i \text{ が } H \text{ のとき}) \\ -1 & (\omega_i \text{ が } T \text{ のとき}) \end{cases}, \quad Z_n = Y_1 + \cdots + Y_n \quad \text{とする.}$$

このとき Y_1, Y_2, \dots は独立同一分布に従い, L_1 上に分布する. $E[Y_1] = 0$ なので, $\{Z_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ は再帰的になる. また, 定理 8, $P(Z_n = 0 \text{ i.o.}) = 1$ となることから, 系 18 により $\{Z_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ は再帰的になることがわかる.