

*Shift-commutative linear operators
and random processes*

九大 教養 瀬 口 常 民

0. まえがき

この報告は、研究途中で未だ不完全な結果であるが、問題提起にもなるかと思い、発表する。

報告者は[4],[5],[6]で、 $S-C.L.Op$ という線型空間上の線型作用素のクラスを定義し、それに関連した主として定常過程の性質を研究した。その頃から、McKean, Levinson, Dym, 飛田氏たちの、splitting field や多重マルコフ性の研究と報告者の研究との関連について検討していた。最近、岡部氏の多重マルコフ性の研究成果を知って、両者の関連が明確になるとともに、報告者のこれまでの研究結果を補うべき部分もはっきりしてきたので、それらの点を指摘しながら、表題の問題について紹介したい。

1. Shift と可換な線型作用素の定義とそのクラス $\tilde{A}$

$\mathcal{F}$ を線型空間, $\{T_t\}_{t \in \mathbb{R}}$ を $\mathcal{F}$ 上の shift, つまり

$$T_t: \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{F},$$

$$T_{t+s} = T_t T_s, \quad T_0 = I$$

をみたす変換とする。ここでは径数 t を実数全体の集合 $\mathbb{R}$ を動くと考えるが, 径数空間は $\mathbb{R}$ とは限らず, 整数全体の集合 $\mathbb{Z}$ でも, 或る加群であってもよい。

定義 1.1 $(\mathcal{A}, \mathcal{D}, \{T_t\})$ が, 条件

(1) $\mathcal{D}$ は $\mathcal{F}$ の部分空間で, 次の (L1) をみたす:

$$(L1) \quad T_t \mathcal{D} \subset \mathcal{D}, \quad (t \in \mathbb{R}),$$

(2) $\mathcal{A}$ は $\mathcal{D}$ 上の線型作用素で, 次の (L2) をみたす:

$$(L2) \quad \mathcal{A} \mathcal{D} \subset \mathcal{F},$$

(3) $\mathcal{A}$ と T_t とは可換である, すなわち

$$(L3) \quad T_t \mathcal{A} = \mathcal{A} T_t, \quad (t \in \mathbb{R})$$

をみたすとき, $\mathcal{A}$ を $(\{T_t\})$ に関する $\mathcal{D}$ 上の) shift と可換な線型作用素 (shift-commutative linear operator, S-C.L. Op. と略記する) という。

この節でこれから取扱う S-C.L.Op. $\mathcal{A}$ は, 次のようなクラスに限る:

(F1) $\mathcal{F}$ は $\mathbb{R}$ 上の 複素数値関数 の全体.

(F2) shift は 平行移動 $T_t f(\cdot) \equiv f(\cdot + t)$.

(F3) Λ は, $\Lambda\Gamma = \Gamma\Lambda$ で, Λe^z が定義できる $z \in \mathbb{C}$ が存在する. ($\mathbb{C}$ は複素数全体の集合を表わす.)

このような S-C.L.O.p. の全体を $\tilde{\Lambda}$ で表わし, $\Lambda \in \tilde{\Lambda}$ の 定義域 を $\tilde{\mathcal{D}}(\Lambda)$ で表わすことにする.

$$\Lambda f(t) \equiv (\Lambda f)(t) = \tau_t[(\Lambda f)(0)] = [\Lambda(\tau_t f)](0)$$

が成り立つことから, 次の補題がえられる.

補題 1.1 任意の $\Lambda \in \tilde{\Lambda}$, $e^z \in \tilde{\mathcal{D}}(\Lambda)$ に対して

$$\Lambda e^{zt} \equiv e^{zt} C_\Lambda(z) \quad (t \in \mathbb{R})$$

をみたす C_Λ が存在する.

定義 1.2 補題 1.1 の関数 C_Λ を Λ の 特性関数 (characterizing function, c.f. と略記する) という. C_Λ の定義域を $\alpha(\Lambda)$ と書く. すなわち $\alpha(\Lambda) = \{z; e^z \in \tilde{\mathcal{D}}(\Lambda)\}$ である.

$\Lambda \in \tilde{\Lambda}$ の逆作用素 Λ' を, $\Lambda\Lambda' = \Lambda'\Lambda = I$ で定義してもよいが, 関数方程式やこの後のことを考慮して, 次のように定義する.

定義 1.3 $\Lambda \in \tilde{\Lambda}$ に対して $\Gamma \in \tilde{\Lambda}$ が ① $\overline{\alpha(\Lambda)} = \overline{\alpha(\Gamma)} = \mathbb{C}$.

② C_Λ の k_0 次の零点は C_Γ の k_0 次の極, C_Λ の k_1 次の極は C_Γ の k_1 次の零点である. ③ $C_\Lambda(C_\Gamma)$ は虚軸上に零点も極ももたない.

④ $z \in \alpha(\Lambda) \cap \alpha(\Gamma)$ に対して $C_\Gamma(z) = 1/C_\Lambda(z)$ をみたすとき, Γ を Λ の 逆作用素 といい, $\Gamma = \Lambda'$ と書く.

S-C.L.O.p. の性質として, 次の補題は今後の議論をすすめる

のに有効である。(証明は省略する.)

補題 1.2 $\Lambda, \Gamma, \Delta \in \tilde{\Lambda}$ に対して,

$$\Delta = a\Lambda + b\Gamma \quad \text{ならば} \quad C_\Delta = aC_\Lambda + bC_\Gamma,$$

$$\Delta = \Lambda\Gamma \quad \text{ならば} \quad C_\Delta = C_\Lambda C_\Gamma$$

$$\Lambda^{-1} \text{が存在する} \quad \text{ならば} \quad C_{\Lambda^{-1}} = 1/C_\Lambda.$$

これからの議論の有効な素材となる いくつかの例 を挙げる.

[1°] クラス $\tilde{\Lambda}_s$

K を有限個の飛躍点をもつ階段関数とする, すなわち

$$(1.1) \quad K(t) = \sum_{t_n \leq t} k_n, \quad k_n \in \mathbb{C}.$$

このとき, 任意の $f \in F$ に対して

$$(1.2) \quad \Lambda f(\cdot) \equiv \sum_n \tau_{t_n} f(\cdot) k_n = \sum_n f(\cdot + t_n) k_n$$

は $S-C.L.O_p$ で, その c.f. は

$$C_\Lambda(z) = \sum_n e^{z t_n} k_n, \quad z \in \mathbb{C}$$

である. このような $S-C.L.O_p$ の全体を $\tilde{\Lambda}_s$ と書くことにする.

[2°] 微分作用素 $D \equiv \frac{d}{dt}$ は, $C_D(z) = z$ を c.f. とする $S-C.L.O_p$ である.

$P(z)$ を n 次の多項式

$$P(z) = \sum_{k=0}^n A_k z^k, \quad A_n \neq 0$$

とすれば, $P(z)$ を c.f. にもつ $S-C.L.O_p$ は

$$\Lambda \equiv P(D) = \sum_{k=0}^n A_k D^k.$$

[3°] 積分作用素 $\beta/(D-\alpha I)$

微分作用素 $(D-\alpha I)/\beta$ を用いて, 微分方程式

$$\frac{1}{\beta} f'(t) - \frac{\alpha}{\beta} f(t) = g(t)$$

を解くことにより, $\beta/(D-\alpha I)$ は $(D-\alpha I)/\beta$ の逆作用素で,

$$\begin{aligned} \Lambda f(t) &\equiv \beta/(D-\alpha I) f(t) = \beta \int^t e^{\alpha(t-s)} f(s) ds \\ &= -\beta \int^0 e^{\alpha u} \tau_u f(t) du \end{aligned}$$

と表わされ, $C_A(z) = \beta/(z-\alpha)$ となることがわかる. ただし

$$\begin{aligned} (1.3) \quad \int^0 e^{\alpha u} \tau_u f(t) du &= -\int^t e^{\alpha(t-s)} f(s) ds \\ &\equiv \begin{cases} \int_{-\infty}^0 e^{\alpha u} \tau_u f(t) du = \int_t^{\infty} e^{\alpha(t-s)} f(s) ds, & (\operatorname{Re} \alpha > 0) \\ -\int_0^{\infty} e^{\alpha u} \tau_u f(t) du = \int_{-\infty}^t e^{\alpha(t-s)} f(s) ds, & (\operatorname{Re} \alpha < 0). \end{cases} \end{aligned}$$

[4°] Convolution transform

Hirschmann-Widder [8] によれば, 任意の分布関数 K に対して,

$$\Lambda f(t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t-s) dK(s)$$

で定義される線型作用素 Λ は,

$$C_A(z) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} e^{-zt} dK(t) \equiv 1/E(z)$$

を c.f. にもつ S-C.L.O.p. であることがわかる. ここで, E は, Pölya の entire 関数のクラス $\mathcal{E}$ に属し,

$$E(z) = e^{-cz^2+bz} \prod_{k=1}^{\infty} (1-z/a_k) e^{z/a_k},$$

$\{a_k\}$, b, c は実定数で, $c \geq 0$, $\sum_{k=1}^{\infty} a_k^2 < \infty$ をみたすものである.

[5°] Riemann-Liouville 型

$$(1) \quad C_A(z) = (z + \beta)^{-\alpha}, \quad \alpha, \beta > 0$$

を c. f. にもつ S-C. L. O_p は

$$(1.4) \quad \Lambda f(t) \equiv (D + \beta I)^{-\alpha} f(t) = 1/\Gamma(\alpha) \int_{-\infty}^t (t-s)^{\alpha-1} e^{-\beta(t-s)} f(s) ds \\ = 1/\Gamma(\alpha) \int_0^{\infty} u^{\alpha-1} e^{-\beta u} \tau_{-u} f(t) du.$$

$$(2) \quad C_A(z) = (z + \beta)^{\alpha}, \quad 0 < \alpha < 1, \beta > 0$$

を c. f. にもつ S-C. L. O_p は

$$(1.5) \quad \Lambda f(t) \equiv (D + \beta I)^{\alpha} f(t) \\ = 1/\Gamma(-\alpha) \int_{-\infty}^t (t-s)^{-\alpha-1} [f(t) - e^{-\beta(t-s)} f(s)] ds \\ = 1/\Gamma(-\alpha) \int_0^{\infty} u^{-\alpha-1} (I - e^{-\beta u} \tau_{-u}) f(t) du.$$

$$(3) \quad C_A(z) = z^{\alpha}, \quad 0 < \alpha < 1$$

を c. f. にもつ S-C. L. O_p は

$$(1.6) \quad \Lambda f(t) \equiv D^{\alpha} f(t) = 1/\Gamma(-\alpha) \int_{-\infty}^t (t-s)^{-\alpha-1} [f(t) - f(s)] ds \\ = 1/\Gamma(-\alpha) \int_0^{\infty} u^{-\alpha-1} (I - \tau_{-u}) f(t) du.$$

$$[6^{\circ}] \quad C_A(z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n z^n, \quad z \in \mathbb{C}$$

を c. f. にもつ S-C. L. O_p は

$$(1.7) \quad \Lambda f \equiv \sum_{n=0}^{\infty} A_n D^n f = \sum_{n=0}^{\infty} A_n f^{(n)}.$$

2. ⑥の部分空間上の S-C. L. O_p の定義

これから紹介することは、前節の最後の例 [6°] を除けば、一応うまくゆくが、多重マルコフ性の中でも特に重要な、無

限重マルコフ性に関係する [6°] の無限階微分作用素の定義に無理がある。しかし、その克服の方向を知るためにも、報告者の結果を紹介する。

(1°) クラス Λ_s

最も基礎的で、これからの議論で重要な役割りを果たす、クラス Λ_s の定義から始めよう。

伊藤氏の定常超過程 $\mathcal{G}$ 上の shift $\{T_t\}$ を、前節 (F 2) の $\tau_t f(\cdot) = f(\cdot + t)$ を用いて、任意の $x \in \mathcal{G}$ に対して

$$T_t x(\varphi) \equiv x(\tau_{-t} \varphi), \quad (\varphi \in \mathcal{J})$$

と定義する。ここで $\mathcal{J}$ は R 上の 急減少関数 の全体である。

定義 2.1 K を前節例 [1°] の $\tilde{\Lambda}_s$ の定義に用いた有限個の点で飛躍する階段関数 (1.1) とする、すなわち

$$K(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} k_n, \quad k_n \in \mathbb{C}.$$

このとき、(1.2) の $\Lambda \in \tilde{\Lambda}_s$ に対応する $\mathcal{G}$ 上の S-C.L.O.p. Λ を、任意の $x \in \mathcal{G}$ に対して

$$(2.1) \quad \Lambda x(\varphi) \equiv \sum_n T_{t_n} x(\varphi) k_n = \sum_n x(\tau_{t_n} \varphi) k_n, \quad (\varphi \in \mathcal{J})$$

で定義し、 $\mathcal{G}$ 上の S-C.L.O.p. と呼ぶ。

普通の定常過程のクラス $\mathcal{G}^0$ については、任意の $x \in \mathcal{G}^0$ に対して、

$$(2.2) \quad \Lambda x(t) \equiv \sum_n \tau_{t_n} x(t) k_n = \sum_n x(t + t_n) k_n, \quad (t \in R)$$

で定義し、 $\mathcal{G}^0$ 上の S-C.L.O.p. と呼ぶ。

(2.1) や (2.2) の型の $S-C.L.O_p$ の全体を クラス Λ_s の $S-C.L.O_p$ という. $\lambda \in \Lambda_s$ の c.f. は, 対応する $\lambda \in \tilde{\Lambda}_s$ の c.f. C_λ とする.

次の補題が, $\mathfrak{G}$ または $\mathfrak{G}^\circ$ における $S-C.L.O_p$ を定義し, その性質をしらべるとき, 重要な役割りを果たすものの一つである. (証明は省略する.)

補題 2.1 $x \in \mathfrak{G}$ が, スペクトル表現

$$x(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} (\mathcal{F}\varphi)(\lambda) Z_x(d\lambda), \quad (\varphi \in \mathcal{J})$$

をもつときは, 任意の $\lambda \in \Lambda_s$ に対して, λx は

$$\lambda x(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} (\mathcal{F}\varphi)(\lambda) C_\lambda(i\lambda) Z_x(d\lambda), \quad (\varphi \in \mathcal{J})$$

$$r_{\lambda x}(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} (\mathcal{F}\varphi)(\lambda) |C_\lambda(i\lambda)|^2 \mu_x(d\lambda), \quad (\varphi \in \mathcal{J})$$

とスペクトル表現される. ここで, $r_{\lambda x}(\varphi)$ は λx の 共分散超関数 で μ_x は x の スペクトル測度, $(\mathcal{F}\varphi)(\lambda) \equiv 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda t} \varphi(t) dt$.

$x \in \mathfrak{G}^\circ$ のときは

$$\lambda x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda t} C_\lambda(i\lambda) Z_x(d\lambda),$$

$$r_{\lambda x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda t} |C_\lambda(i\lambda)|^2 \mu_x(d\lambda).$$

(2°) クラス Λ

以後この報告を通じて, 次の表現や記号を用いることにする. $x \in \mathfrak{G}$ のスペクトル表現と共分散超関数は

$$x(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} (\mathcal{F}\varphi)(\lambda) Z_x(d\lambda), \quad (\varphi \in \mathcal{J})$$

$$r_x(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} (\mathcal{F}\varphi)(\lambda) \mu_x(d\lambda), \quad (\varphi \in \mathcal{S});$$

$x \in \mathfrak{O}^\circ$ のときは

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda t} Z_x(d\lambda), \quad (t \in \mathbb{R}),$$

$$r_x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda t} \mu_x(d\lambda), \quad (t \in \mathbb{R});$$

$Z_x(d\lambda) \equiv Z_x(d\lambda, \omega)$ を x の 直交彷徨測度, μ_x を x の スペクトル測度 という.

$$M \equiv \{ \mu; \int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(\lambda)|^2 \mu(d\lambda) < \infty, \forall \varphi \in \mathcal{S}, \text{非負測度} \},$$

$$M_k \equiv \{ \mu; \int_{-\infty}^{\infty} \mu(d\lambda) / (1+\lambda^2)^k < \infty, \mu \in M \},$$

$$L^2(\mu; \mathcal{S}) \equiv \{ f; \int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(\lambda) f(\lambda)|^2 \mu(d\lambda) < \infty, \forall \varphi \in \mathcal{S} \},$$

$$L^2(\mu; k) \equiv \{ f; \int_{-\infty}^{\infty} |f(\lambda)|^2 / (1+\lambda^2)^k \mu(d\lambda) < \infty \}.$$

$\mathfrak{O}$ または $\mathfrak{O}^\circ$ における S -C.L.O.p. を定義したいが, そのためには次の補題が基本的である.

補題 2.2 $x \in \mathfrak{O}$ と $\{\lambda_n\} \subset \mathbb{A}_s$ に対して, 極限

$$y(\varphi) \equiv \lim_{n \rightarrow \infty} \lambda_n x(\varphi), \quad (\varphi \in \mathcal{S})$$

が存在するための必要十分条件は, ある $C(i\lambda) \in L^2(\mu_x; \mathcal{S})$ が存在して, 次式が成り立つことである:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(\lambda)|^2 |C_{\lambda_n}(i\lambda) - C(i\lambda)|^2 \mu_x(d\lambda) = 0, \quad (\varphi \in \mathcal{S}).$$

このとき, $y \in \mathfrak{O}$ で

$$y(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} (\mathcal{F}\varphi)(\lambda) C_y(i\lambda) Z_x(d\lambda), \quad (\varphi \in \mathcal{S}),$$

$$r_y(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} (\mathcal{F}\varphi)(\lambda) |C_y(i\lambda)|^2 \mu_x(d\lambda), \quad (\varphi \in \mathcal{S})$$

が成り立つ。ただし、 $C(i\lambda)$ と $C_y(i\lambda)$ とは、 μ_x 測度 0 の λ を除いて等しい。

この補題は、 $\mathfrak{G}$ における $S-C.L.Op.$ を次のように定義できることを示している。

定義 2.2 $A \in \tilde{\Lambda}$ の c. f. C_A が、 $x \in \mathfrak{G}$ のスペクトル測度 μ_x に対して、 $C_A(i\lambda) \in L^2(\mu_x; \mathcal{J})$ をみたすとき、 $A \in \tilde{\Lambda}$ に対応する、 $\mathfrak{G}$ における $S-C.L.Op.$ A を

$$(2.3) \quad Ax(\varphi) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} (\mathcal{F}\varphi)(\lambda) C_A(i\lambda) Z_x(d\lambda), \quad (\varphi \in \mathcal{J})$$

で定義し、 $\mathfrak{G}$ における $S-C.L.Op.$ と呼ぶ。

C_A が $x \in \mathfrak{G}^\circ$ のスペクトル測度 μ_x に対して、 $C_A(i\lambda) \in L^2(\mu_x; 0)$ をみたすとき、 $\mathfrak{G}^\circ$ における $S-C.L.Op.$ A を

$$(2.4) \quad Ax(t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda t} C_A(i\lambda) Z_x(d\lambda), \quad (t \in R)$$

で定義し、 $\mathfrak{G}^\circ$ における $S-C.L.Op.$ と呼ぶ。

(2.3) や (2.4) で定義される $S-C.L.Op.$ の全体を クラス Λ の $S-C.L.Op.$ といい、 $A \in \Lambda$ の c. f. は、対応する $A \in \tilde{\Lambda}$ の c. f. C_A とし、その定義域を $\mathcal{D}(A)$ で表わす。

補題 2.2 は、 $\varphi \in \mathcal{J}$ ならば $\mathcal{F}\varphi \in \mathcal{J}$ と、 $A_n x$ と y のスペクトル表現を用いて証明することができる。この補題は、上のようにして Ax の定義ができることを示しているばかりでなく、次の定理が成り立つことも示している。

定理 2.1 $A \in \tilde{\Lambda}$ が $A \in \Lambda$ なるための必要十分条件は、 A

の c. f. C_A に対して, $C_A(i\lambda) \in L^2(\mu; \mathcal{B})$ をみたす $\mu \in M$ が存在することである.

何故なら, 任意の $\mu \in M$ に対して, μ をスペクトル測度とする $x \in \mathcal{G}$ の存在が, Ito [9] によって示されているから.

注意 補題 2.2 と定義 2.2 からわかるように, $x \in \mathcal{G}$ に対して Λx と Γx が定義可能のとき, もし $C_A(i\lambda)$ と $C_\Gamma(i\lambda)$ とが μ_x 測度 0 の λ を除いて等しいならば, $\mathcal{G}$ の元としては $\Lambda x = \Gamma x$ である. しかしわれわれは, $C_A(i\lambda)$ と $C_\Gamma(i\lambda)$ が μ_x 測度 0 の λ で異なったら, $\Lambda x \neq \Gamma x$ と約束しよう.

§1 で挙げた $\tilde{A}$ の例のほとんどはまた A に属する作用素の例となる. ただし, 最後の例 [6°] について言及したい.

Schwartz-超関数では, したがって伊藤-超(定常)過程 $\mathcal{G}$ の意味でも, 無限回微分可能性はいえないので, (1.7) の $\Lambda \in \tilde{A}$ に対応する $\Lambda \in A$ として,

$$(2.5) \quad \Lambda x(\varphi) \equiv \sum_{n=0}^{\infty} A_n x^{(n)}(\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n A_n x(\varphi^{(n)})$$

は定義できない. しかしわれわれは定義 2.2 で, $C_A(i\lambda) \in L^2(\mu_x; \mathcal{B})$ ならば, $\Lambda \in \tilde{A}$ に対応する $\Lambda \in A$ を (2.3) の形

$$\Lambda x(\varphi) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} (\varphi \varphi)(\lambda) C_A(i\lambda) Z_x(d\lambda)$$

で定義したが, この形では定義できる. さらに補題 2.2 は,

定理 2.2 $\Lambda \in \tilde{A}$, $x \in \mathcal{G}$ に対して, Λx が定義可能ならば, $\{\Lambda_n\} \subset A_s$ を適当に選んで

$$\lim_{n \rightarrow \infty} A_n x(\varphi) = Ax(\varphi), \quad (\varphi \in \mathcal{S})$$

とできる。

ことを示している。したがって、 $A \equiv \sum_{n=0}^{\infty} A_n D^n$ に近づくような $A_n \in \mathcal{A}_S$ を選んで、全体として $A \equiv \sum_{n=0}^{\infty} A_n D^n$ を $A_n \in \mathcal{A}_S$ の極限として考えることは可能であろう。この2つの理由から、われわれは c.f. として $\sum_{n=0}^{\infty} A_n z^n \equiv C_A(z)$ をもつ $A \in \mathcal{A}$ を symbol 的に次のように書くことにしよう：

$$(2.6) \quad Ax = \sum_{n=0}^{\infty} A_n x^{(n)}.$$

しかしこの解釈は苦しいのである。岡部氏は、佐藤-超関数に相当する hyperprocesses を導入し、(2.6) の意味づけを行ない、他の人は x のスペクトル表現を用いて hyperprocesses の意味での (2.6) の意味づけの試みもあるようだ。スペクトル表現を用いる方向での意味づけなら、純非決定性を用いなくて (2.6) の意味づけが行なえないだろうか？さらには定常性も仮定しないで、一般の確率過程に対しても、(2.6) の意味づけが行なえないだろうか？

3. 確率関数方程式 $Ay = x$

前節の終りに述べたような方向に研究を進めるとき起るであろう問題を摘出するために、次の確率関数方程式を考える。

$$(3.1) \quad Ay = x.$$

この節では問題点が発散しないように、 $x, y \in \mathcal{G}$ または $\mathcal{G}^\circ$ を仮定する。問題は① x を既知としたときの解 y の形, ② 解の一意性, ③ x と y が (3.1) をみたすとき, $\mathbb{L}^2(X; t) = \mathbb{L}^2(Y; t)$ をみたすための条件を求めることにしぼって考える。ただし, $\mathbb{L}^2(X; t)$ は, $\mathcal{G}^\circ$ では $\{x(s, \omega); s \leq t, \omega \in \Omega\}$ の張る 2 乗平均の意味での閉線型空間, $\mathcal{G}$ では $\mathcal{J}_t \equiv \{\varphi; \text{car.}(\varphi) \in (-\infty, t], \varphi \in \mathcal{J}\}$ とするとき, $\{x(\varphi, \omega); \varphi \in \mathcal{J}_t, \omega \in \Omega\}$ の張る 2 乗平均の意味での閉線型空間である。

いま $N_A \equiv \{\lambda; C_A(i\lambda) = 0, \lambda \in R\}$ とおく。このとき,

定理 3.1 (1) $N_A = \emptyset$ のとき,

① もし A^{-1} が存在するならば $y = A^{-1}x$.

② A^{-1} が存在しなくても, $y(\varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} (\mathcal{F}\varphi)(\lambda) / C_A(i\lambda) Z_x(d\lambda)$.
(一意)

(2) $N_A \neq \emptyset$ ならば

$$y = y_0 + y_s.$$

ただし, $y_s(\varphi) \equiv \int_{R-N_A} (\mathcal{F}\varphi)(\lambda) / C_A(i\lambda) Z_x(d\lambda)$,

y_0 は $Ay = 0$ の解で, $y_0 \perp y_s$.

$y, x \in \mathcal{G}^\circ$ のときも同様.

この証明も省略するが, (2) のとき $y_0 \perp y_s$ となるのは, y が定常過程だからその Z_y は直交彷徨測度でなければならないことと, $Z_y = Z_{y_0} + Z_{y_s}$ から出る結論であることを注意しておく。

さらに Λ_- を過去だけに關係する S-C.L.Op. のクラスとすると、次の定理が成り立つ。(証明は省略する.)

定理 3.2 $A \in \Lambda_-$ ならば (3.1) の解 y と x との間には

$$\mathbb{L}^2(Y; t) \supset \mathbb{L}^2(X; t), \quad (t \in R)$$

が成り立つ。さらに $A^{-1} \in \Lambda_-$ が存在する ($A, A^{-1} \in \Lambda_-$) ならば、(3.1) の解 $y (= A^{-1}x)$ は一意で

$$\mathbb{L}^2(Y; t) = \mathbb{L}^2(X; t), \quad (t \in R).$$

定理 3.1, (1) ② から、 $A, A^{-1} \in \Lambda_-$ が必ずしも (3.1) の解 y の一意性と $\mathbb{L}^2(Y; t) = \mathbb{L}^2(X; t)$ の必要条件とはいえない ($x, y \in \mathcal{G}$ または $\mathcal{G}^\circ$ と限っているから) が、“ $A, A^{-1} \in \Lambda_-$ ” が成り立つ条件を求めることは重要な問題であることは理解いただけると思う。特に非定常の場合まで含めれば、この条件が^{後者の}必要十分になることはほとんど明らかであろう。ここに、 A^{-1} の定義を定義 1.3 の形で与えた意味がある。証明には準備がいるから (§1 の例が重要な役割りを果たす) 省略するが、次の定理が成り立つ。

定理 3.3 $A, A^{-1} \in \Lambda_-$ が成り立つための必要十分条件は、 C_1 の零点と極が (もし存在すれば) 左半平面にあり、定義域が $\overline{\alpha(A)} = \mathbb{C}$ をみたすことである。

以上の結果をふまえて次に進む。

4. 方程式 $Ax = \xi$ とその応用

ξ を 白色雑音 (white noise) とするとき, 方程式

$$(4.1) \quad Ax = \xi, \quad A \in \mathcal{A}$$

をとりあげる. この節では ① (4.1) をみたす x がクラス $\mathcal{G}_0$ ($\mu_x \in \mathcal{M}_0$ を意味する) に属する条件, ② $\mathbb{L}^2(X; t) = \mathbb{L}^2(\Xi; t)$ の条件, ③ x の過去, 現在, 未来の従属関係 (マルコフ性を含む) などの問題を主として取扱う.

定理 4.1 (1) 方程式 (4.1) で $x \in \mathcal{G}_0$ を解にもつ必要十分条件は, $N_A = \emptyset$ かつ $1/C_A(i\lambda) \in L^2(m; 0)$ が成り立つこと. ただし, m は $m(d\lambda) \equiv d\lambda$ であるような (普通の) 測度.

(2) (4.1) の解 $x \in \mathcal{G}_0$ に対応する $x \in \mathcal{G}$ は,

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda t} / C_A(i\lambda) \tilde{\xi}(d\lambda),$$

ただし, $\tilde{\xi}$ は一様直交彷徨測度で, 次式で与えられる:

$$\tilde{\xi}(S) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_S e^{i\lambda t} d\lambda \right) d\xi(t).$$

(3) $\int_{-\infty}^{\infty} \log |C_A(i\lambda)| / (1 + \lambda^2) d\lambda > -\infty$ ならば, x は純非決定的である. この条件は C_A が定理 3.3 の条件をみたすことと同値である (したがって $N_A = \emptyset$ を含む).

(4) (3) の条件と $1/C_A(i\lambda) \in L^2(m; 0)$ が成り立てば, 方程式 (4.1) の $\mathcal{G}_0$ に属する解 x が存在し, x は純非決定的で, $\mathbb{L}^2(X; t) = \mathbb{L}^2(\Xi; t)$ が成り立つ.

この証明も準備が大変だから省略する.

定理 4.2 方程式 (4.1) の A の c. f. C_A が次の条件をみたすとする.

- (i) $C_A(z) = \sum_n A_n z^n \equiv A_0 \prod_k (1 - z/\alpha_k)$ (entire 関数).
- (ii) $\operatorname{Re} \alpha_k < 0$ (すべての k に対して).
- (iii) $1/C_A(i\lambda) \in L^2(m; 0)$.

このとき, 次の結果が成り立つ:

- (1) $A^{-1} \in \mathcal{A}_-$ が存在して, $x = A^{-1} \xi \in \mathcal{G}_0$.
- (2) $\mathbb{L}^2(X; t) = \mathbb{L}^2(\Xi; t)$, ($t \in \mathcal{R}$)
- (3) ある関数 F が存在して $x(t) = \int_{-\infty}^t F(t-s) d\xi(s)$ と標準表現ができる. (実はこの表現が $x = A^{-1} \xi$.)

この定理の条件をみたす具体例を挙げよう.

[1°] E を Polya クラス $\mathcal{E}$ に属する関数とする, すなわち

$$E(z) = e^{-cz^2 + bz} \prod_{k=1}^{\infty} (1 - z/a_k) e^{z/a_k},$$

$\{a_k\}$, b, c は実定数, $c \geq 0$, $\sum_k a_k^{-2} < \infty$.

このとき, $C_A(z) \equiv E(-z)$ が定理 4.2 の 3 条件をみたす必要十分条件は, 次の条件をみたすことである:

$$(E) \quad \sum_k a_k^{-1} = -b, \quad a_k > 0, \quad c = 0.$$

証明 条件 (i), (ii) をみたすことは明らかだから条件 (iii) をみたすことを示せばよい. これは

$$E(z)/|z|^2 \rightarrow \infty \quad (z \rightarrow \pm i\infty), \quad E(-i\lambda) \neq 0$$

から証明できる.

[2°] Urbanik [7] の例によると, スペクトル密度関数

$$(4.2) \quad g_x(\lambda) = c / \prod_{k=1}^{\infty} (1 + \lambda^2 / a_k^2), \quad c > 0, \quad 0 < a_1 < a_2 < \dots, \\ \overline{\lim}_{k \rightarrow \infty} a_k / a_{k+1} < 1.$$

をもつ定常過程はマルコフ性をもつことを示している.

(4.2) の $g_x(\lambda)$ をスペクトル密度関数にもつ $x \in \mathfrak{G}$ を確率関数方程式 (4.1) の立場から考えると, ($c = 1/A_0^2$ とおくと)

$$C_A(z) = A_0 \prod_{k=1}^{\infty} (1 - z/a_k), \quad = A_0 \prod_{k=1}^{\infty} (1 + z/a_k), \\ = A_0 \prod_{k=1}^{\infty} (1 \pm z/a_k) \quad (\pm \text{は} + \text{か} - \text{かの何れか}),$$

の3通りの場合が考えられる. しかし定理 4.2 の3条件をみたす場合は, 才2の場合, すなわち条件

$$(U) \quad C_A(z) = A_0 \prod_{k=1}^{\infty} (1 + z/a_k), \quad A_0 \in \mathbb{R}, \quad 0 < a_1 < a_2 < \dots, \\ \overline{\lim}_{k \rightarrow \infty} a_k / a_{k+1} < 1$$

をみたす場合であることがわかる.

注意 定理 3.3 の条件は, 方程式 (4.1) の解 x を非定常過程にまで拡張して考えるとき, (非定常部分を定常部分と直交すると仮定すれば) $t \rightarrow \infty$ のとき, 非定常部分 $\rightarrow 0$ を保証する条件でもある. また多重マルコフ性の条件として, 例えば 3 や 4 で少し触れたように, C_A の零点と極の分布状態が関係してくることは明らかだから, この種の条件も求められたら面白いと思う.

文 献

- [1] Dym, H. and McKean Jr., H. P. Application of de Brange spaces of integral functions to the prediction of stationary Gaussian processes, Illinois J. Math., 14 (1970), 299-343.
- [2] Hida, T. Canonical representations of Gaussian processes and their applications, Mem. Coll. Sci. Kyôto Univ., 33 (1960), 109-155.
- [3] Levinson, N. and McKean Jr., H. P. Weighted trigonometrical approximation on R^1 with application to the germ field of a stationary Gaussian noise, Acta Math., 112 (1964), 99-143.
- [4] Seguchi, T. Shift-commutative linear operators and stationary processes, Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ., Ser. A, 23 (1969), 106-155.
- [5] ——— An application of shift-commutative linear operators to linear automatic control systems with randomness, ibid, 24 (1970), 120-145.
- [6] ——— Certain operators of Riemann-Liouville type and stationary processes, Math. Rep. Coll. General Education, Kyushu Univ., 7 (1970), 23-35.
- [7] Urbanik, K. Generalized stationary Gaussian processes of Markovian character, Studia Math., 21 (1962), 261-282.
- [8] Hirschmann, I. I. and Widder, D. V. The convolution transforms, Princeton Univ. Press.
- [9] Ito, K. Stationary random distributions, Mem. Fac. Sci. Univ. Kyoto, 28 (1953), 209-223.