

§7. 代数的構造

ここでは、実数値連続関数全体の集合の代数的構造について述べていこう。 X を位相空間とし、 $f, g \in C(X)$, $c \in \mathbf{R}$ とする。このとき、定理4.1, 問題4-1で述べたように、 $f+g, cf, fg \in C(X)$ が定められるのであった。このような和、スカラー倍、積といった演算に注目し、次のように定める。

定義 7.1 A を \mathbf{R} 上のベクトル空間とし、 $x, y \in A$ に対して、積 $xy \in A$ を対応させる写像 $A \times A \rightarrow A$ があたえられているとする。次の (1)~(3) がなりたつとき、 A を \mathbf{R} 上の多元環という。

- (1) 任意の $x, y, z \in A$ に対して、 $(x+y)z = xz + yz$, $x(y+z) = xy + xz$. (分配律)
- (2) 任意の $c \in \mathbf{R}$ および任意の $x, y \in A$ に対して、 $(cx)y = c(xy) = x(cy)$.
- (3) 任意の $x, y, z \in A$ に対して、 $(xy)z = x(yz)$. (結合律)

例 7.1 X を位相空間とすると、 $C(X)$ は \mathbf{R} 上の多元環である。

例 7.2 まず、 \mathbf{R}^2 は \mathbf{R} 上のベクトル空間である。ここで、 $(a, b), (c, d) \in \mathbf{R}^2$ に対して、 $(a, b)(c, d) \in \mathbf{R}^2$ を

$$(a, b)(c, d) = (ac - bd, ad + bc)$$

により定める。このとき、 \mathbf{R}^2 は \mathbf{R} 上の多元環となることが分かる。この多元環は複素数全体の集合に通常のと、スカラー倍および積を考えたものに他ならない。

更に、多元環の構造をもつような多元環の部分集合を考え、次のように定める。

定義 7.2 A を \mathbf{R} 上の多元環とし、 B を A の部分集合とする。次の (1), (2) がなりたつとき、 B を A の部分多元環という。

- (1) B はベクトル空間としての A の部分空間である。
- (2) 任意の $x, y \in B$ に対して、 $xy \in B$.

注意 7.1 定義7.2において、部分多元環は \mathbf{R} 上の多元環となる。また、ベクトル空間の部分空間の性質より、 B が A の部分多元環であるとは、 B が空ではなく、任意の $x, y \in B$ および任意の $c \in \mathbf{R}$ に対して、 $x+y, cx, xy \in B$ となることと同値である。

例 7.3 S を多項式として表される $C(\mathbf{R})$ の元全体の集合とする。このとき、 S は $C(\mathbf{R})$ の部分多元環である。

一方、 $n \in \mathbf{N}$ を固定しておき、 T を n 次以下の多項式として表される $C(\mathbf{R})$ の元全体の集合とする。このとき、 T は $C(\mathbf{R})$ の部分多元環ではない。実際、2つの n 次多項式の積は $2n$ 次になってしまうからである。

例 7.4 例7.2において、 $X \subset \mathbf{R}^2$ を

$$X = \{(a, 0) \mid a \in \mathbf{R}\}$$

により定める。このとき、 X は \mathbf{R}^2 の部分多元環となる。 X は \mathbf{R} に通常のと、スカラー倍および積を考えたものと同一視することができる。

一方、 $Y \subset \mathbf{R}^2$ を

$$Y = \{(0, a) \mid a \in \mathbf{R}\}$$

により定める. このとき, Y は \mathbf{R}^2 の部分多元環ではない. 実際, $a, b \in \mathbf{R} \setminus \{0\}$ とすると, $(0, a), (0, b) \in Y$ であるが,

$$\begin{aligned}(0, a)(0, b) &= (0 \cdot 0 - ab, 0 \cdot b + a \cdot 0) \\ &= (-ab, 0) \\ &\notin Y\end{aligned}$$

となるからである.

以下では, $C(X)$ の一様収束位相を考える. まず, 次がなりたつ.

定理 7.1 X をコンパクト空間, S を $C(X)$ の部分多元環とすると, \bar{S} は $C(X)$ の部分多元環である.

証明 $f, g \in \bar{S}$ とする. このとき, 閉包の性質より, S の点列 $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}, \{g_n\}_{n=1}^{\infty}$ を

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(f_n, f) = \lim_{n \rightarrow \infty} d(g_n, g) = 0$$

となるように選んでおくことができる.

まず, S は $C(X)$ の部分多元環だから, 各 $n \in \mathbf{N}$ に対して, $f_n + g_n \in S$ である. また, $x \in X$ とすると, 三角不等式より,

$$\begin{aligned}|(f_n + g_n)(x) - (f + g)(x)| &= |(f_n(x) - f(x)) + (g_n(x) - g(x))| \\ &\leq |f_n(x) - f(x)| + |g_n(x) - g(x)|\end{aligned}$$

である. よって,

$$\begin{aligned}d(f_n + g_n, f + g) &\leq d(f_n, f) + d(g_n, g) \\ &\rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)\end{aligned}$$

となるから,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(f_n + g_n, f + g) = 0$$

である. したがって, $f + g \in \bar{S}$ である.

次に, S は $C(X)$ の部分多元環だから, $c \in \mathbf{R}$ とすると, 各 $n \in \mathbf{N}$ に対して, $cf_n \in S$ である. また, $x \in X$ とすると,

$$|(cf_n)(x) - (cf)(x)| = |c||f(x) - f_n(x)|$$

である. よって,

$$\begin{aligned}d(cf_n, cf) &= |c|d(f_n, f) \\ &\rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)\end{aligned}$$

となるから,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(cf_n, cf) = 0$$

である. したがって, $cf \in \bar{S}$ である.

更に, S は $C(X)$ の部分多元環だから, 各 $n \in \mathbf{N}$ に対して, $f_n g_n \in S$ である. また, $x \in X$ とすると,

$$\begin{aligned} |(f_n g_n)(x) - (fg)(x)| &= |f_n(x)g_n(x) - f(x)g(x)| \\ &\leq |f_n(x)||g_n(x) - g(x)| + |g(x)||f_n(x) - f(x)| \\ &\leq (|f_n(x) - f(x)| + |f(x)|)|g_n(x) - g(x)| + |g(x)||f_n(x) - f(x)| \end{aligned}$$

である. ここで, X はコンパクトであり, $f \in C(X)$ だから,

$$\|f\| = \max\{|f(x)| \mid x \in X\} \in \mathbf{R}$$

である. $\|g\|$ についても同様である. よって,

$$\begin{aligned} d(f_n g_n, fg) &\leq (d(f_n, f) + \|f\|)d(g_n, g) + \|g\|d(f_n, f) \\ &\rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

となるから,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(f_n g_n, fg) = 0$$

である. したがって, $fg \in \bar{S}$ である.

以上および注意 7.1 より, \bar{S} は $C(X)$ の部分多元環である. □

また, 次がなりたつ.

定理 7.2 X をコンパクト空間, S を $C(X)$ の部分多元環とする. $f \in S$ ならば, $|f| \in \bar{S}$ である.

証明 $\|f\| = 0$, すなわち, $f = 0$ のときは明らかである.

$\|f\| > 0$ とする. 問題 5-3 のように, $g_n, g \in C[0, 1]$ ($n \in \mathbf{N}$) を

$$\begin{cases} g_1(t) = 0, \\ g_{n+1}(t) = g_n(t) + \frac{t - (g_n(t))^2}{2}, \end{cases} \quad g(t) = \sqrt{t} \quad (t \in [0, 1])$$

により定める. このとき, $f_n \in C(X)$ を

$$f_n(x) = g_n \left(\left(\frac{f(x)}{\|f\|} \right)^2 \right) \quad (x \in X)$$

により定める. g_n は実数係数の多項式として表され, S は $C(X)$ の部分多元環だから, $f_n \in S$ である. また, 問題 5-3 より, $\{g_n\}_{n=1}^{\infty}$ は g に一様収束するから, $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ は $\frac{1}{\|f\|}|f|$ に一様収束する. よって,

$$\frac{1}{\|f\|}|f| \in \bar{S}$$

である. 更に, 定理 7.1 より,

$$\begin{aligned} |f| &= \|f\| \left(\frac{1}{\|f\|}|f| \right) \\ &\in \bar{S} \end{aligned}$$

である. □

問題 7

1. 2次の実正方行列全体の集合を $M_2(\mathbf{R})$ と表す. このとき, $M_2(\mathbf{R})$ は通常のと, スカラー倍および積によって, \mathbf{R} 上の多元環となる. ここで, $A \subset M_2(\mathbf{R})$ を

$$A = \left\{ \left(\begin{array}{cc} a & b \\ -b & a \end{array} \right) \mid a, b \in \mathbf{R} \right\}$$

により定める. A は $M_2(\mathbf{R})$ の部分多元環であることを示せ.

2. $f, g \in C(\mathbf{R})$ に対して, $f * g \in C(\mathbf{R})$ を

$$(f * g)(t) = \int_0^t f(t-s)g(s) ds \quad (t \in \mathbf{R})$$

により定める. $f * g$ を f と g の畳み込みという. このとき, 置換積分法より,

$$f * g = g * f$$

であることが分かる. 更に, $h \in C(\mathbf{R})$ とすると,

$$(f * g) * h = f * (g * h)$$

であることを示せ. なお, $C(\mathbf{R})$ を通常のとスカラー倍によって, \mathbf{R} 上のベクトル空間とみなし, 更に, 畳み込みを積とすることにより, $C(\mathbf{R})$ は \mathbf{R} 上の多元環となる.

3. X を第一可算公理をみたす位相空間, A を X の空でない部分集合とし, $a \in \bar{A}$ とする. このとき, a に収束する A の点列が存在することを示せ.
4. X を非可算集合とし, X の余可算位相を考える. すなわち, \mathfrak{D} を X の開集合系とすると,

$$\mathfrak{D} = \{O \subset X \mid X \setminus O \text{ は高々可算}\} \cup \{\emptyset\}$$

である. $A \subset X$ が非可算なとき, $\bar{A} = X$ であることを示せ. なお, $A \neq X$ のとき, $a \in X \setminus A$ とすると, a に収束する A の点列は存在しないことが分かる.

5. X をコンパクト空間とする. また, $n \in \mathbf{N}$, $n \geq 2$ とし, $f_1, f_2, \dots, f_n \in C(X)$ に対して,

$$\max(f_1, f_2, \dots, f_n)(x) = \max\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\} \quad (x \in X)$$

とおく.

- (1) $\max(f_1, f_2, \dots, f_n) \in C(X)$ となることを示せ. 同様に,

$$\min(f_1, f_2, \dots, f_n)(x) = \min\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\} \quad (x \in X)$$

とおくと, $\min(f_1, f_2, \dots, f_n) \in C(X)$ となる.

- (2) S を $C(X)$ の部分多元環とする. $f_1, f_2, \dots, f_n \in S$ ならば, $\max(f_1, f_2, \dots, f_n) \in \bar{S}$ となることを示せ. 同様に, $f_1, f_2, \dots, f_n \in S$ ならば, $\min(f_1, f_2, \dots, f_n) \in \bar{S}$ となる.

問題7の解答

1. $X, Y \in A$ とし,

$$X = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} c & d \\ -d & c \end{pmatrix} \quad (a, b, c, d \in \mathbf{R})$$

と表しておく.

まず,

$$\begin{aligned} X + Y &= \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c & d \\ -d & c \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} a+c & b+d \\ -(b+d) & a+c \end{pmatrix} \\ &\in A \end{aligned}$$

である.

次に, $k \in \mathbf{R}$ とすると,

$$\begin{aligned} kX &= k \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} ka & kb \\ -kb & ka \end{pmatrix} \\ &\in A \end{aligned}$$

である.

更に,

$$\begin{aligned} XY &= \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c & d \\ -d & c \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} ac - bd & ad + bc \\ -(ad + bc) & ac - bd \end{pmatrix} \\ &\in A \end{aligned}$$

である.

以上および注意 7.1 より, A は $M_2(\mathbf{R})$ の部分多元環である.

2. $t \in \mathbf{R}$ とすると,

$$\begin{aligned} ((f * g) * h)(t) &= (h * (g * f))(t) \\ &= \int_0^t h(t-s)(g * f)(s) ds \\ &= \int_0^t h(t-s) \left(\int_0^s g(s-r)f(r) dr \right) ds \\ &= \int_{\{(r,s) | 0 \leq r \leq s \leq t\}} f(r)g(s-r)h(t-s) dr ds \\ &= \int_0^t f(r) \left(\int_r^t h(t-s)g(s-r) ds \right) dr \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^t f(r) \left(\int_0^{t-r} h(t-r-u)g(u) du \right) dr \\
&= \int_0^t f(r)(h * g)(t-r) dr \\
&= ((h * g) * f)(t) \\
&= (f * (g * h))(t)
\end{aligned}$$

である. よって,

$$(f * g) * h = f * (g * h)$$

である.

3. X は第一可算公理をみたすから, a のある可算基本近傍系 $(U_n)_{n \in \mathbf{N}}$ が存在し,

$$U_1 \supset U_2 \supset \cdots \supset U_n \supset \cdots$$

となる. 閉包の定義より, a は A の外点ではないから, 各 $n \in \mathbf{N}$ に対して, $a_n \in U_n \cap A$ を選んでおくことができる. ここで, O を $a \in O$ となる X の開集合とすると, 基本近傍系の定義より, ある $N \in \mathbf{N}$ が存在し, $U_N \subset O$ となる. 更に, $n \in \mathbf{N}$, $n \geq N$ ならば,

$$\begin{aligned}
a_n &\in U_n \\
&\subset U_N \\
&\subset O,
\end{aligned}$$

すなわち, $a_n \in O$ である. よって, A の点列 $\{a_n\}_{n=1}^\infty$ は a に収束する.

4. F を $A \subset F$ となる X の閉集合とする. 余可算位相の定義より, F は高々可算であるか, または, $F = X$ である. ここで, A は非可算だから, $F = X$ である. よって, $\overline{A} = X$ である.

5. (1) n に関する数学的帰納法により示す.

$n = 2$ のとき, $f_1, f_2 \in C(X)$ だから,

$$\begin{aligned}
\max(f_1, f_2) &= \frac{1}{2} \{(f_1 + f_2) + |f_1 - f_2|\} \\
&\in C(X)
\end{aligned}$$

である.

$n = k$ ($k \geq 2$) のとき, 題意がなりたつと仮定する. このとき, $\max(f_2, \dots, f_{k+1}) \in C(X)$ となるから,

$$\begin{aligned}
\max(f_1, f_2, \dots, f_{k+1}) &= \max(f_1, \max(f_2, \dots, f_{k+1})) \\
&\in C(X)
\end{aligned}$$

である. よって, $n = k + 1$ のとき, 題意がなりたつ.

したがって, 題意がなりたつ.

(2) (1) の証明および定理 7.1, 定理 7.2 より, 題意がなりたつ.