

Lauricella 超幾何微分方程式系のグレブナー基底について

中山 洋将

NAKAYAMA HIROMASA

神戸大学大学院理学研究科/ JST CREST

DEPARTMENT OF MATHEMATICS, GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE, KOBE UNIVERSITY *†

1 Introduction

Lauricella 超幾何級数 F_A, F_B, F_C は

$$F_A(a, b_1, \dots, b_m, c_1, \dots, c_m; x_1, \dots, x_m) = \sum_{n_1, \dots, n_m \in \mathbb{Z}_{\geq 0}} \frac{(a)_{n_1 + \dots + n_m} (b_1)_{n_1} \cdots (b_m)_{n_m}}{(c_1)_{n_1} \cdots (c_m)_{n_m} (1)_{n_1} \cdots (1)_{n_m}} x_1^{n_1} \cdots x_m^{n_m}$$

$$F_B(a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_m, c; x_1, \dots, x_m) = \sum_{n_1, \dots, n_m \in \mathbb{Z}_{\geq 0}} \frac{(a_1)_{n_1} \cdots (a_m)_{n_m} (b_1)_{n_1} \cdots (b_m)_{n_m}}{(c)_{n_1 + \dots + n_m} (1)_{n_1} \cdots (1)_{n_m}} x_1^{n_1} \cdots x_m^{n_m}$$

$$F_C(a, b, c_1, \dots, c_m; x_1, \dots, x_m) = \sum_{n_1, \dots, n_m \in \mathbb{Z}_{\geq 0}} \frac{(a)_{n_1 + \dots + n_m} (b)_{n_1 + \dots + n_m}}{(c_1)_{n_1} \cdots (c_m)_{n_m} (1)_{n_1} \cdots (1)_{n_m}} x_1^{n_1} \cdots x_m^{n_m}$$

と定義される。ここで、 a, b, c, a_i, b_i, c_i ($i = 1, \dots, m$) は複素パラメータであり、 $c, c_i \notin \mathbb{Z}_{\leq 0}$ を満たすとする。これら F_A, F_B, F_C が満たす微分方程式系として、次のものがそれぞれ知られている。

$$\ell_i^A \cdot F_A = 0, \quad \ell_i^A = \theta_i(\theta_i + c_i - 1) - x_i(\theta_1 + \dots + \theta_m + a)(\theta_i + b_i) \quad (i = 1, \dots, m).$$

$$\ell_i^B \cdot F_B = 0, \quad \ell_i^B = \theta_i(\theta_1 + \dots + \theta_m + c - 1) - x_i(\theta_i + a_i)(\theta_i + b_i) \quad (i = 1, \dots, m).$$

$$\ell_i^C \cdot F_C = 0, \quad \ell_i^C = \theta_i(\theta_i + c_i - 1) - x_i(\theta_1 + \dots + \theta_m + a)(\theta_1 + \dots + \theta_m + b) \quad (i = 1, \dots, m).$$

ここで、 $\partial_i = \frac{\partial}{\partial x_i}$ は x_i についての微分作用素、 $\theta_i = x_i \partial_i$ は x_i についての Euler 作用素である。

上で定義した微分作用素の生成する D イdeal

$$I_A(m) = D \cdot \{\ell_i^A \mid i = 1, \dots, m\}, \quad I_B(m) = D \cdot \{\ell_i^B \mid i = 1, \dots, m\}, \quad I_C(m) = D \cdot \{\ell_i^C \mid i = 1, \dots, m\},$$

と \widehat{D} イdeal

$$\widehat{I}_A(m) = \widehat{D} \cdot \{\ell_i^A \mid i = 1, \dots, m\}, \quad \widehat{I}_C(m) = \widehat{D} \cdot \{\ell_i^C \mid i = 1, \dots, m\}.$$

を考える。ここで $D = \mathbb{C}[x_1, \dots, x_m][\partial_1, \dots, \partial_m]$ は多項式係数微分作用素環、 $\widehat{D} = \mathbb{C}[[x_1, \dots, x_m]][\partial_1, \dots, \partial_m]$ は形式べき級数を係数に持つ微分作用素環である。この各イdealについて、ある単項式順序、項順序について、グレブナー基底がわかる。得られたグレブナー基底を使うと、 F_A, F_B, F_C の各微分方程式系の特異点集合を計算することができる。ここでは F_B の場合の特異点集合の計算について述べる。

*nakayama@math.kobe-u.ac.jp

†本研究は科研費(課題番号:24740064)およびJST CREST"数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索"の助成を受けたものである。

2 Lauricella 超幾何微分方程式系についてのグレブナー基底

まず F_B の微分方程式系に対応する D イデアル $I_B(m)$ について, グレブナー基底を導く.

定理 1 ($I_B(m)$ のグレブナー基底)

D 上の項順序 $\langle_{(0,1)}$ を次のように定義する. ここで, ξ_i は θ_i に対応する可換な変数とする.

$$x_1^{\alpha_1} \cdots x_m^{\alpha_m} \xi_1^{\beta_1} \cdots \xi_m^{\beta_m} \langle_{(0,1)} x_1^{\alpha'_1} \cdots x_m^{\alpha'_m} \xi_1^{\beta'_1} \cdots \xi_m^{\beta'_m}$$

を下のいずれかが成り立つ時と定義する.

1. $\beta_1 + \cdots + \beta_m < \beta'_1 + \cdots + \beta'_m$
2. $\beta_1 + \cdots + \beta_m = \beta'_1 + \cdots + \beta'_m$ かつ $\alpha_1 + \cdots + \alpha_m < \alpha'_1 + \cdots + \alpha'_m$
3. $\beta_1 + \cdots + \beta_m = \beta'_1 + \cdots + \beta'_m$ かつ $\alpha_1 + \cdots + \alpha_m = \alpha'_1 + \cdots + \alpha'_m$ かつ $x_1^{\alpha_1} \cdots x_m^{\alpha_m} \xi_1^{\beta_1} \cdots \xi_m^{\beta_m} \langle' x_1^{\alpha'_1} \cdots x_m^{\alpha'_m} \xi_1^{\beta'_1} \cdots \xi_m^{\beta'_m}$. ここで \langle' はあらかじめ設定した適当な項順序, 例えば辞書式順序などである.

この時, D イデアル $I_B(m)$ の $\langle_{(0,1)}$ についてのグレブナー基底は, $\{l_1^B, \dots, l_m^B\}$ である.

これを示すには, Buchberger の判定法を用いて, 各ペアの S 式について 0 に簡約できることを示す必要がある. これを簡単に言うため, 次の補題を用いる. この補題は多項式環ではよく知られた補題の微分作用素環版である.

補題 2 (Buchberger の省ける S 式の判定法 (微分作用素環版))

微分作用素 $P, Q \in D$, D 上の項順序を \langle とする. 先頭項 $\text{in}_{\langle}(P), \text{in}_{\langle}(Q)$ が互いに素の時, P と Q の S 式 $S_{\langle}(P, Q)$ は交換子 $-[P, Q]$ まで簡約できる.

証明 簡単のため P, Q の先頭項の係数を 1 と仮定しておく. 先頭項 $\text{in}_{\langle}(P), \text{in}_{\langle}(Q)$ が互いに素より,

$$\begin{aligned} S_{\langle}(P, Q) &= (Q - \text{rest}_{\langle}(Q))P - (P - \text{rest}_{\langle}(P))Q \\ &= -\text{rest}_{\langle}(Q)P + \text{rest}_{\langle}(P)Q + QP - PQ \\ &= -\text{rest}_{\langle}(Q)P + \text{rest}_{\langle}(P)Q - [P, Q] \end{aligned}$$

ここで, $\text{rest}_{\langle}(P)$ は P の先頭項以外の部分を表す. よって, S 式 $S_{\langle}(P, Q)$ は P, Q を使い簡約すれば, $-[P, Q]$ まで簡約できる. ■

証明 (定理 1 の証明) 元 l_i^B, l_j^B ($1 \leq i < j \leq m$) について, S 式が 0 に簡約できることを示せばよい. 先頭項は $\text{in}_{\langle(0,1)}(l_i^B) = x_i^3 \xi_i^2, \text{in}_{\langle(0,1)}(l_j^B) = x_j^3 \xi_j^2$ で, 互いに素であるから補題 2 を使うことができる. 交換子を計算すると,

$$\begin{aligned} [l_i^B, l_j^B] &= l_i^B l_j^B - l_j^B l_i^B \\ &= x_i(\theta_i + a_i)(\theta_i + b_i)\theta_j - x_j(\theta_j + a_j)(\theta_j + b_j)\theta_i \\ &\xrightarrow[l_i^B, l_j^B]{*} \theta_i(\theta_1 + \cdots + \theta_m + c - 1)\theta_j - \theta_j(\theta_1 + \cdots + \theta_m + c - 1)\theta_i = 0 \end{aligned}$$

ここで, $\xrightarrow[l_i^B, l_j^B]{*}$ は, l_i^B, l_j^B を使って簡約することを表す記号である. 交換子は 0 に簡約できるので, 補題 2 より, S 式 $S_{\langle(0,1)}(l_i^B, l_j^B)$ は 0 に簡約できる. Buchberger の判定法より, $\{l_1^B, \dots, l_m^B\}$ は $\langle_{(0,1)}$ についてグレブナー基底である. ■

次に \widehat{D} イデアル $\widehat{I}_A(m)$ について, グレブナー基底を導く.

定理 3 ($\widehat{I}_A(m)$ のグレブナー基底)

\widehat{D} 上の単項式順序 $\langle_{(0,1)'} \rangle$ を次のように定義する.

$$x_1^{\alpha_1} \cdots x_m^{\alpha_m} \xi_1^{\beta_1} \cdots \xi_m^{\beta_m} \langle_{(0,1)'} x_1^{\alpha'_1} \cdots x_m^{\alpha'_m} \xi_1^{\beta'_1} \cdots \xi_m^{\beta'_m}$$

を下のいずれかが成り立つ時と定義する.

1. $\beta_1 + \cdots + \beta_m < \beta'_1 + \cdots + \beta'_m$
2. $\beta_1 + \cdots + \beta_m = \beta'_1 + \cdots + \beta'_m$ かつ $\alpha_1 + \cdots + \alpha_m > \alpha'_1 + \cdots + \alpha'_m$
3. $\beta_1 + \cdots + \beta_m = \beta'_1 + \cdots + \beta'_m$ かつ $\alpha_1 + \cdots + \alpha_m = \alpha'_1 + \cdots + \alpha'_m$ かつ $x_1^{\alpha_1} \cdots x_m^{\alpha_m} \xi_1^{\beta_1} \cdots \xi_m^{\beta_m} \langle x_1^{\alpha'_1} \cdots x_m^{\alpha'_m} \xi_1^{\beta'_1} \cdots \xi_m^{\beta'_m}$. ここで \langle はあらかじめ設定した適当な項順序, 例えば辞書式順序などである.

\widehat{D} イdeal $\widehat{I}_A(m)$ の $\langle_{(0,1)'} \rangle$ についてのグレブナー基底は, $\{\ell_1^A, \dots, \ell_m^A\}$ である.

証明 このような単項式順序 $\langle_{(0,1)'} \rangle$ であっても, 補題 2 と同様のことが成り立つ. このことを使い, 定理を証明する. 元 ℓ_i^A, ℓ_j^A ($1 \leq i < j \leq m$) について, S 式が 0 に簡約できることを示せばよい. 先頭項は $\text{in}_{\langle_{(0,1)'} \rangle}(\ell_i^A) = x_i^{\alpha_i} \xi_i^{\beta_i}$, $\text{in}_{\langle_{(0,1)'} \rangle}(\ell_j^A) = x_j^{\alpha_j} \xi_j^{\beta_j}$ で, 互いに素であるから補題 2 の類似を使うことができる. 交換子を計算すれば $[\ell_i^A, \ell_j^A] = 0$ となる. よって, S 式 $S_{\langle_{(0,1)'} \rangle}(\ell_i^A, \ell_j^A)$ は 0 に簡約できる. \widehat{D} の $\langle_{(0,1)'} \rangle$ についての Buchberger の判定法 ([1], [5]) より, $\{\ell_1^A, \dots, \ell_m^A\}$ はグレブナー基底である. ■

\widehat{D} イdeal $\widehat{I}_C(m)$ の場合も, $\widehat{I}_A(m)$ と同様の手順でグレブナー基底がわかる.

定理 4 ($\widehat{I}_C(m)$ のグレブナー基底)

\widehat{D} イdeal $\widehat{I}_C(m)$ の $\langle_{(0,1)'} \rangle$ についてのグレブナー基底は, $\{\ell_1^C, \dots, \ell_m^C\}$ である.

注意 1

D イdeal $I_A(m), I_C(m)$, また F_D の満たす微分方程式系に対応する D イdeal について, 項順序 $\langle_{(0,1)'} \rangle$ に関するグレブナー基底は複雑であり, どうなるかはわかっていない.

3 Lauricella 超幾何関数 F_B の特異点集合の計算

[3] では, Lauricella 超幾何関数 F_C について特異点集合を計算している. その計算に倣い, 今得られたグレブナー基底を使って F_B の特異点集合を計算する. 定理 1 より, $I_B(m)$ の $\langle_{(0,1)} \rangle$ についてのグレブナー基底は $\{\ell_1^B, \dots, \ell_m^B\}$ であった. ここで, 重みベクトル $(0,1) = (0, \dots, 0, 1, \dots, 1) \in \mathbb{Z}^{2m}$ とおく. すなわち, x_i の重みを 0, ξ_i の重みを 1 とおいたものである. 微分作用素 $P = \sum_{\alpha, \beta \in (\mathbb{Z}_{\geq 0})^m} c_{\alpha, \beta} x^\alpha \xi^\beta \in D$ について, $(0,1)$ イニシャルフォームとは, 全表象 $P(x, \xi) = \sum_{\alpha, \beta \in (\mathbb{Z}_{\geq 0})^m} c_{\alpha, \beta} x^\alpha \xi^\beta \in \mathbb{C}[x, \xi]$ の項で $(0,1)$ 重みについて最大のものたちの和

$$\text{in}_{(0,1)}(P) = \sum_{(0,1) \cdot (\alpha, \beta) \text{ が } P(x, \xi) \text{ 中で最大}} c_{\alpha, \beta} x^\alpha \xi^\beta$$

である. D イdeal I について, $(0,1)$ イニシャルフォームイdeal とは,

$$\text{in}_{(0,1)}(I) = \langle \text{in}_{(0,1)}(P) \mid P \in I \rangle$$

なる $\mathbb{C}[x, \xi]$ のイデアルである。グレブナー基底の一般論から、 $(0, 1)$ イニシャルフォームイデアル $\text{in}_{(0,1)}(I_B(m))$ の生成元として、 $\text{in}_{(0,1)}(\ell_1^B), \dots, \text{in}_{(0,1)}(\ell_m^B)$ が得られる。ここで、 ℓ_i^B の $(0, 1)$ イニシャルフォームは、

$$\text{in}_{(0,1)}(\ell_i^B) = x_i \xi_i \left(x_i(1-x_i)\xi_i + \sum_{1 \leq j \leq m, j \neq i} x_j \xi_j \right)$$

である。これを L_i^B とおいておく。これより次のことがわかる。

命題 5 ($I_B(m)$ の特性多様体)

D イデアル $I_B(m)$ の特性多様体は $\text{Ch}(I_B(m)) = \mathbf{V}(L_1^B, \dots, L_m^B)$ である。

D イデアル $I_B(m)$ について特異点集合とは、

$$\text{Sing}(I_B(m)) = \pi(\text{Ch}(I_B(m)) \setminus \{\xi_1 = \dots = \xi_m = 0\})$$

であった。ここで、 $\pi: \mathbb{C}^{2m} \ni (x_1, \dots, x_m, \xi_1, \dots, \xi_m) \mapsto (x_1, \dots, x_m) \in \mathbb{C}^m$ なる射影である。今、特性多様体 $\text{Ch}(I_B(m)) = \mathbf{V}(L_1^B, \dots, L_m^B)$ と具体的に分かっている。

$$L_1^B = 0, \dots, L_m^B = 0$$

すなわち、

$$x_i \xi_i = 0 \text{ or } x_i(1-x_i)\xi_i + \sum_{1 \leq k \leq m, k \neq i} x_k \xi_k = 0 \quad (i=1, \dots, m) \quad (1)$$

の解 $(x_1, \dots, x_m, \xi_1, \dots, \xi_m)$ で $(\xi_1, \dots, \xi_m) \neq (0, \dots, 0)$ なるものを計算し、それを x 座標だけに射影したものが特異点集合になる。上の式 (1) を $\varepsilon_i \in \{0, 1\}$ を使ってまとめて書けば、

$$x_i(1-\varepsilon_i x_i)\xi_i + \sum_{1 \leq k \leq m, k \neq i} \varepsilon_i x_k \xi_k = 0 \quad (i=1, \dots, m, \varepsilon_i \in \{0, 1\}) \quad (2)$$

$\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_m) \in \{0, 1\}^m$ を一つ固定する。上の式 (2) を行列表示すれば、

$$\begin{pmatrix} x_1(1-\varepsilon_1 x_1) & \varepsilon_1 x_2 & \cdots & \varepsilon_1 x_m \\ \varepsilon_2 x_1 & x_2(1-\varepsilon_2 x_2) & \cdots & \varepsilon_2 x_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_m x_1 & \varepsilon_m x_2 & \cdots & x_m(1-\varepsilon_m x_m) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

上の行列を A_ε とおく。式 (2) が $(\xi_1, \dots, \xi_m) \neq (0, \dots, 0)$ なる解を持つための必要十分条件は、 $\det(A_\varepsilon) = 0$ である。これは ε を固定した時なので、 ε を $\{0, 1\}^m$ 全体を動かせば、特異点集合の定義方程式が出てくる。

$\prod_{\varepsilon \in \{0,1\}^m} \det(A_\varepsilon)$ を計算すれば、

$$\begin{aligned} \prod_{\varepsilon \in \{0,1\}^m} \det(A_\varepsilon) &= x_1^{2^m} \cdots x_m^{2^m} \prod_{1 \leq i_1 \leq m} (1-x_{i_1}) \prod_{1 \leq i_1 < i_2 \leq m} (x_{i_1} x_{i_2} - x_{i_1} - x_{i_2}) \cdots \\ &\quad (-1)^{m-1} (-x_1 x_2 \cdots x_m + x_2 \cdots x_m + \cdots + x_1 \cdots x_{m-1}) \end{aligned}$$

となる。

定理 6 (F_B の特異点集合)

F_B の特異点集合は、

$$\begin{aligned} \text{Sing}(I_B(m)) &= \mathbf{V}(x_1 \cdots x_m \prod_{1 \leq i_1 \leq m} (1-x_{i_1}) \prod_{1 \leq i_1 < i_2 \leq m} (x_{i_1} x_{i_2} - x_{i_1} - x_{i_2}) \cdots \\ &\quad (x_1 x_2 \cdots x_m - x_2 \cdots x_m - \cdots - x_1 \cdots x_{m-1})) \end{aligned}$$

で与えられる。

参 考 文 献

- [1] F. Castro, Calculs effectifs pour les idéaux d'opérateurs différentiels, Travaux en Cours 24, (1987), 1 - 19
- [2] T. Koyama, H. Nakayama, K. Nishiyama, N. Takayama, The Holonomic Rank of the Fisher-Bingham System of Differential Equations, [arXiv:1205.6144](#)
- [3] R. Hattori, N. Takayama, The singular locus of Lauricella's F_C , [arXiv:1110.6675](#)
- [4] K. Matsumoto, Appell and Lauricella Hypergeometric Functions, preprint.
- [5] 大阿久俊則, グレブナ基底と線型偏微分方程式系 (計算代数解析入門), 上智大学数学講究録, No. 38, (1994)
- [6] M. Saito, B. Sturmfels, N. Takayama, *Gröbner Deformations of Hypergeometric Differential Equations*, Springer, 2000