

終結式について

内海 和樹

2025 年 3 月 28 日



<https://github.com/kazutsumi/Resultants>

1 終結式の定義

多項式の係数はいずれも整域 R の元としておく．こうしておくと多項式の係数を商体 $\text{Rat}(R)$ の元として分数に拡張できる．さらに方程式の解は代数閉包 $\overline{\text{Rat}(R)}$ 上で考えられる．もしかしたら R を PID か UFD くらいに仮定しといた方が安全かもしれない．

定義 (終結式). 多項式 $f(x) = \sum_{i=0}^m a_m x^i$ と $g(x) = \sum_{j=0}^n b_n x^j$ ($a_m, b_n \neq 0$) に対して

$$\text{Syl}(f, g) := \left[\begin{array}{ccccccccc} a_m & a_{m-1} & \cdots & a_1 & a_0 & & & & \\ & a_m & a_{m-1} & \cdots & a_1 & a_0 & & & \\ & & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & & \\ & & & a_m & a_{m-1} & \cdots & a_1 & a_0 & \\ b_n & b_{n-1} & \cdots & b_1 & b_0 & & & & \\ & b_n & b_{n-1} & \cdots & b_1 & b_0 & & & \\ & & \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots & & \\ & & & b_n & b_{n-1} & \cdots & b_1 & b_0 & \end{array} \right] \begin{array}{l} \left. \vphantom{\begin{matrix} a_m \\ a_{m-1} \\ \vdots \\ a_1 \\ a_0 \end{matrix}} \right\} n \\ \left. \vphantom{\begin{matrix} b_n \\ b_{n-1} \\ \vdots \\ b_1 \\ b_0 \end{matrix}} \right\} m \end{array}$$

を f と g のシルベスター行列といい，その行列式

$$\text{resul}(f, g) := \det(\text{Syl}(f, g))$$

を f と g の終結式 (**resultant**) という．なお，零でない定数 $g(x) = b_0 \neq 0$ に対しては

$$\text{Syl}(f, b_0) = \begin{bmatrix} b_0 & & \\ & \ddots & \\ & & b_0 \end{bmatrix}, \quad \text{resul}(f, b_0) = b_0^m$$

であり，同様に $\text{resul}(a_0, g) = a_m^n$ である．また，共に非零定数の場合は $\text{resul}(a_0, b_0) = 1$ とし，一方が零多項式の場合は $\text{resul}(f, 0) = \text{resul}(0, g) = 0$ と定める．

注意. 上で定義した $\text{Syl}(f, g)$ の転置行列をシルベスター行列と呼ぶ流儀もある．

例 1. $f(x) = x^3 + 1$, $g(x) = x^2 + 2x + 1$, $h(x) = x^2 + 1$ とする．

$$\text{resul}(f, g) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 1 \end{vmatrix} = 0, \quad \text{resul}(f, h) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 2$$

2 終結式と共通根

以下, f, g は次のような多項式とする. ただし, $a_m, b_n \neq 0$ とする.

$$f(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i = a_m \prod_{i=1}^m (x - \alpha_i), \quad g(x) = \sum_{j=0}^n b_j x^j = b_n \prod_{j=1}^n (x - \beta_j)$$

定理 1. f と g は共通根を持つ. $\iff \text{resul}(f, g) = 0$.

証明. (\Rightarrow) $f(\gamma) = g(\gamma) = 0$ とすると, $\gamma^i f(\gamma) = \gamma^j g(\gamma) = 0$ なので以下が成り立つ.

$$\begin{bmatrix} a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 \\ 0 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ b_2 & b_1 & b_0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & b_1 & b_0 & 0 \\ 0 & 0 & b_2 & b_1 & b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma^4 \\ \gamma^3 \\ \gamma^2 \\ \gamma \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (m=3, n=2 \text{ の場合})$$

同次形連立 1 次方程式 $\text{Syl}(f, g)\mathbf{x} = \mathbf{0}$ が非自明解を持つので $\text{resul}(f, g) = 0$ である.

(\Leftarrow) 以下の補題 1 より従う. □

補題 1. $\text{resul}(f, g) = a_m^n b_n^m \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n (\alpha_i - \beta_j)$

証明. 定理 1 の (\Rightarrow) から $\alpha_i = \beta_j$ のとき $\text{resul}(f, g) = 0$ なので, 因数定理より $T := \prod \prod (\alpha_i - \beta_j)$ は $\text{resul}(f, g)$ を割り切る. そこで, 各 α_i, β_j の多項式として $\text{resul}(f, g)$ と T の次数を評価し, 係数を比較すればよい.

$$\begin{aligned} f(x)/a_m &= x^m + A_1 x^{m-1} + \cdots + A_m = \prod_{i=1}^m (x - \alpha_i), \\ g(x)/b_n &= x^n + B_1 x^{n-1} + \cdots + B_n = \prod_{j=1}^n (x - \beta_j) \end{aligned}$$

とすると, $m=3, n=2$ の場合

$$\text{resul}(f, g) = a_3^2 b_2^3 \begin{vmatrix} 1 & A_1 & A_2 & A_3 & 0 \\ 0 & 1 & A_1 & A_2 & A_3 \\ 1 & B_1 & B_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & B_1 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & B_1 & B_2 \end{vmatrix}$$

である. 各 A_k は $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ の, 各 B_k は β_1, \dots, β_n の k 次基本対称式の ± 1 倍である. また, 各 A_i, B_j はそれぞれ α_i, β_j の 1 次式なので, $\text{resul}(f, g)$ は α_i に関して高々 n 次で, β_j に関して高々 m 次である. 従って, $\text{resul}(f, g)$ は T の定数倍であり, α_1^n の係数を比較して, $\text{resul}(f, g) = a_m^n b_n^m T$ がわかる. \square

例 2. $f(x) = ax^2 + bx + c$ ($a \neq 0$) とする. $f'(x) = 2ax + b$ であり,

$$\text{resul}(f, f') = \begin{vmatrix} a & b & c \\ 2a & b & 0 \\ 0 & 2a & b \end{vmatrix} = -a(b^2 - 4ac)$$

より, $b^2 - 4ac = 0$ のとき f, f' は共通根を持つ. また, このとき f は重根を持つ.

定理 2. 非定数多項式 f に対して, 以下は同値.

- (1) f は重根を持つ.
- (2) f, f' は共通根を持つ.
- (3) $\text{resul}(f, f') = 0$.

定理 3.

$$\text{resul}(f, f') = (-1)^{m(m-1)/2} a_m^{2m-1} \prod_{1 \leq i < j \leq m} (\alpha_i - \alpha_j)^2$$

証明. 補題 1 より, 一般に

$$\text{resul}(f, g) = a_m^n b_n^m \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n (\alpha_i - \beta_j) = a_m^n \prod_{i=1}^m \left(b_n \prod_{j=1}^n (\alpha_i - \beta_j) \right) = a_m^n \prod_{i=1}^m g(\alpha_i)$$

が成り立つ. これを $g = f'$ として適用して

$$\text{resul}(f, f') = a_m^{m-1} \prod_{i=1}^m f'(\alpha_i)$$

を得る. $f'(x) = a_m \sum_{i=1}^m \prod_{j \neq i} (x - \alpha_j)$ より $f'(\alpha_i) = a_m \prod_{j \neq i} (\alpha_i - \alpha_j)$ から従う. \square

定義 (判別式). 2 次以上の多項式 f に対して以下の $\text{disc}(f)$ を f の判別式という.

$$\text{disc}(f) = a_m^{2m-2} \prod_{1 \leq i < j \leq m} (\alpha_i - \alpha_j)^2 = \frac{(-1)^{m(m-1)/2}}{a_m} \text{resul}(f, f')$$

定理 2, 3 より, f が重根を持つことと $\text{disc}(f) = 0$ は同値である.

例 3. $f(x) = x^3 + px + q$ とする. $f'(x) = 3x^2 + p$ より, $\text{disc}(f)$ は以下の通り.

$$\text{disc}(f) = (-1)^3 \text{resul}(f, f') = - \begin{vmatrix} 1 & 0 & p & q & 0 \\ 0 & 1 & 0 & p & q \\ 3 & 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & p \end{vmatrix} = -(4p^3 + 27q^2)$$

定理 4. f を実係数 3 次多項式とする.

$$\text{disc}(f) \begin{cases} > 0 & (f \text{ は相異なる 3 個の実根を持つ}) \\ = 0 & (f \text{ は重根を持ち, どの根も実数}) \\ < 0 & (f \text{ は 1 個の実根と 2 個の互いに共役な虚根を持つ}) \end{cases}$$

証明. f の根 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ が互いに相異なる実数のとき, 定義から $\text{disc}(f) > 0$ である. f が重根を持つとき, $\text{disc}(f) = 0$ である. α_1 が実数で α_2, α_3 が互いに共役な虚数のとき,

$$\begin{aligned} \text{disc}(f) &= a_3^{2 \cdot 3 - 2} (\alpha_1 - \alpha_2)^2 (\alpha_1 - \alpha_3)^2 (\alpha_2 - \alpha_3)^2 \\ &= a_3^4 ((\alpha_1 - \alpha_2) (\overline{\alpha_1 - \alpha_2}))^2 (2i (\Im \alpha_2))^2 = -4a_3^4 |\alpha_1 - \alpha_2|^2 (\Im \alpha_2)^2 < 0 \end{aligned}$$

である. f は実係数なので実根は 1 個以上あり, 虚根は偶数個で重根ではない. □

例 4 (接点 t 問題). 点 (a, b) から曲線 $y = x^3 - 3x$ に引ける接線の本数が 3 本になるときの a, b の条件を求めよう.

点 (a, b) を通る直線 $y = m(x - a) + b$ と曲線 $y = x^3 - 3x$ が接するための必要十分条件は, 3 次多項式 $f(x) = x^3 - 3x - (m(x - a) + b)$ が重根を持つこと, つまり

$$\text{resul}(f, f') = -4m^3 + 9(3a^2 - 4)m^2 - 54(ab + 2)m + 27(b - 2)(b + 2) = 0$$

が成り立つことである. そして, このような接線が 3 本存在することは, 上の m に関する 3 次方程式が異なる 3 実解を持つことと同値である. つまり,

$$g(m) = -4m^3 + 9(3a^2 - 4)m^2 - 54(ab + 2)m + 27(b - 2)(b + 2)$$

において, $\text{disc}(g) > 0$ となる条件を求めればよい.

$$\text{disc}(g) = \frac{-1}{-4} \text{resul}(g, g') = 314928(a^3 - 3a - b)(3a + b)^3$$

より, $(a^3 - 3a - b)(3a + b) > 0$ が求める条件である.

3 終結式と共通因子

定理 5. 定数でない多項式 f, g に関して以下は同値である.

- (1) f, g は定数でない共通因子を持つ.
- (2) 以下を満たす多項式 U, V (少なくとも一方は非零多項式) が存在する.

$$Uf + Vg = 0, \quad \deg U < n, \deg V < m$$

- (3) $\text{resul}(f, g) = 0$.

証明. (1) \Rightarrow (2) h を f, g の共通因子とし, $f = hf_1, g = hg_1$ とする.

$$g_1 \cdot f + (-f_1) \cdot g = g_1hf_1 - f_1hg_1 = 0$$

より, $U = g_1, V = -f_1$ とすればよい.

(2) \Rightarrow (1) $Uf + Vg = 0, \deg U < n, \deg V < m, V \neq 0$ とする. f, g が共通因子を持たないとする, $\tilde{U}f + \tilde{V}g = 1$ を満たす多項式 \tilde{U}, \tilde{V} が存在する. $Vg = -Uf$ なので

$$V = V(\tilde{U}f + \tilde{V}g) = \tilde{U}Vf + \tilde{V}Vg = \tilde{U}Vf + \tilde{V}(-Uf) = (\tilde{U}V - \tilde{V}U)f$$

である. $V \neq 0$ なので $\deg V \geq \deg f = n$ より, $\deg V < n$ に矛盾する.

(2) \Leftrightarrow (3) 簡単のため, $m = 3, n = 2$ とする. 一般の場合も同様である.

$$U = \sum_{i=0}^{n-1} u_i x^i = u_1 x + u_0, \quad V = \sum_{j=0}^{m-1} v_j x^j = v_2 x^2 + v_1 x + v_0$$

とおき, $\mathbf{w}^\top = \begin{bmatrix} u_1 & u_0 & v_2 & v_1 & v_0 \end{bmatrix}$ とすると

$$Uf + Vg = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} a_3 u_1 + b_2 v_2 = 0 \\ a_2 u_1 + a_3 u_0 + b_1 v_2 + b_2 v_1 = 0 \\ a_1 u_1 + a_2 u_0 + b_0 v_2 + v_1 v_1 + b_2 v_0 = 0 \\ a_0 u_1 + a_1 u_0 + b_0 v_1 + b_1 v_0 = 0 \\ a_0 u_0 + b_0 v_0 = 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} a_3 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ a_2 & a_3 & b_1 & b_2 & 0 \\ a_1 & a_2 & b_0 & b_1 & b_2 \\ a_0 & a_1 & 0 & b_0 & b_1 \\ 0 & a_0 & 0 & 0 & b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_0 \\ v_2 \\ v_1 \\ v_0 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_5 \Leftrightarrow \text{Syl}(f, g)^\top \mathbf{w} = \mathbf{0}_5$$

なので, $\text{resul}(f, g) = \det(\text{Syl}(f, g)^\top)$ と合わせて以下を得る.

$$(2) \Leftrightarrow \text{同次形連立 1 次方程式 } \text{Syl}(f, g)^\top \mathbf{x} = \mathbf{0} \text{ が非自明解を持つ} \Leftrightarrow (3)$$

□

定理 6. 非零多項式 $f, g \in R[x]$ に対して次を満たす $U, V \in \text{Rat}(R)[x]$ が存在する.

$$Uf + Vg = \text{resul}(f, g)$$

特に, f, g の一方が非定数なら, $U, V \in R[x]$ である.

証明. $\text{resul}(f, g) = 0$ なら $U = V = 0$ とし, f, g の一方が定数, 例えば $f = a_0$ なら

$$\text{resul}(a_0, g) = a_0^n = a_0^{n-1} \cdot f + 0 \cdot g$$

とすればよいので, f, g 共に定数でないとし, $\text{resul}(f, g) \neq 0$ とする. まず,

$$\tilde{U}f + \tilde{V}g = 1$$

を満たす多項式 \tilde{U}, \tilde{V} を構成する. $\tilde{U} = \sum_{i=0}^{n-1} u_i x^i$, $\tilde{V} = \sum_{j=0}^{m-1} v_j x^j$ とおくと,

$$\tilde{U}f + \tilde{V}g = 1 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} a_3 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ a_2 & a_3 & b_a & b_2 & 0 \\ a_1 & a_2 & b_0 & b_1 & b_2 \\ a_0 & a_1 & 0 & b_0 & b_1 \\ 0 & a_0 & 0 & 0 & b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_0 \\ v_2 \\ v_1 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

である ($m = 3, n = 2$ の場合). この係数行列は $\text{Syl}(f, g)^\top$ であり, その行列式は $\text{resul}(f, g) \neq 0$ なのでこれは唯一つの解を持つ. クラームルの公式から, 例えば u_1 は

$$u_1 = \frac{1}{\text{resul}(f, g)} \begin{vmatrix} 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & b_a & b_2 & 0 \\ 0 & a_2 & b_0 & b_1 & b_2 \\ 0 & a_1 & 0 & b_0 & b_1 \\ 1 & a_0 & 0 & 0 & b_0 \end{vmatrix}$$

であり, この行列式部分は R の元である. 他の u_i, v_j についても同様なので, 共通の分母 $\text{resul}(f, g)$ を払って $U = \text{resul}(f, g)\tilde{U}$, $V = \text{resul}(f, g)\tilde{V}$ とすれば, $Uf + Vg = \text{resul}(f, g)$ である. □

4 2 変数多項式の終結式と消去法

k を体とする. 以下 $f, g \in k[x, y] = (k[y])[x]$ は次のような多項式とする.

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^m a_i(y)x^i, \quad g(x, y) = \sum_{j=0}^n b_j(y)x^j, \quad a_m, b_n \neq 0$$

係数環を $R = k[y]$ として定まる終結式 $\text{resul}(f, g) \in k[y]$ を $\text{resul}_x(f, g)(y)$ と書く. 同様に, シルベスター行列も $\text{Syl}_x(f, g)(y)$ と書く.

例 5. $f(x, y) = x^2 + y^2 - 1$, $g(x, y) = x^2 + xy + y^2 - 1$ とすると,

$$\text{resul}_x(f, g)(y) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & y^2 - 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y^2 - 1 \\ 1 & y & y^2 - 1 & 0 \\ 0 & 1 & y & y^2 - 1 \end{vmatrix} = y^4 - y^2 = y^2(y+1)(y-1)$$

である. この根 $y = 0$ を f, g に代入すると,

$$f(x, 0) = g(x, 0) = x^2 - 1 = (x+1)(x-1)$$

となり, $f(1, 0) = g(1, 0) = 0$ と $f(-1, 0) = g(-1, 0) = 0$ がわかる. 残りの根 $y = -1, 1$ も同様に f, g に代入すると,

$$\begin{cases} f(x, -1) = x^2 \\ g(x, -1) = x^2 - x = x(x-1) \end{cases} \quad \begin{cases} f(x, 1) = x^2 \\ g(x, 1) = x^2 + x = x(x+1) \end{cases}$$

となり, $f(0, 1) = g(0, 1) = 0$ と $f(0, -1) = g(0, -1) = 0$ がわかる. つまり,

$$(x, y) = (1, 0), \quad (-1, 0), \quad (0, 1), \quad (0, -1)$$

の 4 点は連立方程式 $f(x, y) = g(x, y) = 0$ の解である. 実はこれが解の全てであることが以下の定理 7 によって保証される.

定理 7. $f(\alpha, \beta) = g(\alpha, \beta) = 0 \implies \text{resul}_x(f, g)(\beta) = 0$

証明. f, g のいずれかが零多項式なら明らかなので, 共に零でないとする. 定理 6 から

$$U(x, y)f(x, y) + V(x, y)g(x, y) = \text{resul}_x(f, g)(y)$$

を満たす $U(x, y), V(x, y) \in k[x, y]$ が存在するので, $f(\alpha, \beta) = g(\alpha, \beta) = 0$ ならば $\text{resul}_x(f, g)(\beta) = 0$ である. \square

例 6. 2 変数関数 $f(x, y) = xy(x^2 + y^2 - 4)$ の停留点を全て求めるために、連立方程式 $f_x(x, y) = f_y(x, y) = 0$ を解く.

$$f_x(x, y) = 3yx^2 + y(y^2 - 4), \quad f_y(x, y) = x^3 + (3y^2 - 4)x$$

なので、終結式 $\text{resul}_x(f_x, f_y)$ は第 1 列に関する余因子展開を利用しつつ

$$\begin{aligned} \text{resul}_x(f_x, f_y)(y) &= \begin{vmatrix} 3y & 0 & y(y^2 - 4) & 0 & 0 \\ 0 & 3y & 0 & y(y^2 - 4) & 0 \\ 0 & 0 & 3y & 0 & y(y^2 - 4) \\ 1 & 0 & 3y^2 - 4 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 3y^2 - 4 & 0 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & -8y(y^2 - 1) & 0 & 0 \\ 0 & 3y & 0 & y(y^2 - 4) & 0 \\ 0 & 0 & 3y & 0 & y(y^2 - 4) \\ 1 & 0 & 3y^2 - 4 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 3y^2 - 4 & 0 \end{vmatrix} \\ &= - \begin{vmatrix} 0 & -8y(y^2 - 1) & 0 & 0 \\ 3y & 0 & y(y^2 - 4) & 0 \\ 0 & 3y & 0 & y(y^2 - 4) \\ 1 & 0 & 3y^2 - 4 & 0 \end{vmatrix} \\ &= - \begin{vmatrix} 0 & -8y(y^2 - 1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -8y(y^2 - 1) & 0 \\ 0 & 3y & 0 & y(y^2 - 4) \\ 1 & 0 & 3y^2 - 4 & 0 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} -8y(y^2 - 1) & 0 & 0 \\ 0 & -8y(y^2 - 1) & 0 \\ 3y & 0 & y(y^2 - 4) \end{vmatrix} = 64y^3(y - 2)(y + 2)(y - 1)^2(y + 1)^2 \end{aligned}$$

と計算できる. これより, $\text{resul}_x(f_x, f_y)(y) = 0$ の解 $y = 0, \pm 1, \pm 2$ が得られるので,

- $f_x(x, 0) = 0$ かつ $f_y(x, 0) = x(x^2 - 4) = 0 \Leftrightarrow x = 0, \pm 2$
- $f_x(x, 1) = 3(x^2 - 1) = 0$ かつ $f_y(x, 1) = x(x^2 - 1) = 0 \Leftrightarrow x = \pm 1$
- $f_x(x, -1) = -3(x^2 - 1) = 0$ かつ $f_y(x, -1) = x(x^2 - 1) = 0 \Leftrightarrow x = \pm 1$
- $f_x(x, 2) = 6x^2 = 0$ かつ $f_y(x, 2) = x(x^2 + 8) = 0 \Leftrightarrow x = 0$
- $f_x(x, -2) = -6x^2 = 0$ かつ $f_y(x, -2) = x(x^2 + 8) = 0 \Leftrightarrow x = 0$

より, f の停留点は $(0, 0)$, $(\pm 2, 0)$, $(1, \pm 1)$, $(-1, \pm 1)$, $(0, \pm 2)$ の 9 点である.

y に関する方程式 $\text{resul}_x(f, g)(y) = 0$ は連立方程式 $f(x, y) = g(x, y) = 0$ から変数 x を消去した方程式である. この $\text{resul}_x(f, g)(y) = 0$ の解 $y = \beta$ を $f(x, y) = g(x, y) = 0$ の解 $(x, y) = (\alpha, \beta)$ へと拡張する, というのが 2 変数終結式の使い方である.

ところが, $\text{resul}_x(f, g)(\beta) = 0$ となる β に対していつでも $f(\alpha, \beta) = g(\alpha, \beta) = 0$ となる α が存在するとは限らない. 以下のような例がある.

例 7. $f(x, y) = (y - 1)x^2 + (y^2 - 2y)x + y - 3$, $g(x, y) = (y - 1)x - 1$ に対して

$$\text{resul}_x(f, g)(y) = \begin{vmatrix} y-1 & y^2-2y & y-3 \\ y-1 & -1 & 0 \\ 0 & y-1 & -1 \end{vmatrix} = 2(y-1)^2(y-2)$$

なので, $\text{resul}_x(f, g)(y) = 0$ の解として $y = 1, 2$ が得られる. 一方で,

$$f(x, 1) = -x - 2, \quad g(x, 1) = -1$$

なので, $f(\alpha, 1) = g(\alpha, 1) = 0$ を満たす α は存在しない.

例 7 のようなことが起こるのは, $f(x, 1), g(x, 1)$ の x に関する最高次の係数が 0 となることで, $\text{Syl}(f(x, 1), g(x, 1))$ の次数が下がり,

$$0 = \text{resul}_x(f, g)(1) \neq \text{resul}(f(x, 1), g(x, 1)) = -1$$

となっていることが原因である. このような問題は, 2 変数多項式の終結式 $\text{resul}_x(f, g)(y)$ に $y = \beta$ を代入した $\text{resul}_x(f, g)(\beta)$ と, $f(x, y), g(x, y)$ に $y = \beta$ を代入したものの終結式 $\text{resul}(f(x, \beta), g(x, \beta))$ が一致していれば発生しない.

定理 8. 次を満たす $\beta \in \bar{k}$ に対して, $f(\alpha, \beta) = g(\alpha, \beta) = 0$ を満たす $\alpha \in \bar{k}$ が存在する.

$$\text{resul}_x(f, g)(\beta) = \text{resul}(f(x, \beta), g(x, \beta)) = 0$$

証明. 定理 1 から $f(x, \beta), g(x, \beta)$ に共通根 $\alpha \in \bar{k}$ が存在し, $f(\alpha, \beta) = g(\alpha, \beta) = 0$. \square

実際には, $f(x, \beta), g(x, \beta)$ の最高次係数が共に 0 でなければ, 2 つの終結式は一致する.

補題 2. $\beta \in \bar{k}$ に対して, $a_m(\beta) \neq 0$ かつ $b_n(\beta) \neq 0$ であれば以下が成り立つ.

$$\text{resul}_x(f, g)(\beta) = \text{resul}(f(x, \beta), g(x, \beta))$$

証明. $a_m(\beta) \neq 0$ かつ $b_n(\beta) \neq 0$ のとき, 2 つのシルベスター行列 $\text{Syl}_x(f, g)(\beta)$ と $\text{Syl}(f(x, \beta), g(x, \beta))$ は共に $(m + n)$ 次正方行列で各成分が等しい. つまり, $\text{Syl}_x(f, g)(\beta) = \text{Syl}(f(x, \beta), g(x, \beta))$ でなので, 両者の行列式も当然等しい. \square

例 8. 例 7 の $\text{resul}_x(f, g)(y) = 0$ の解 $y = 2$ に関しては, $f(x, 2) = x^2 - 1$, $g(x, 2) = x - 1$ より, いずれも最高次数が下がらず,

$$\text{Syl}_x(f, g)(2) = \text{Syl}(f(x, 2), g(x, 2)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

である. さらに, $f(1, 2) = g(1, 2) = 0$ である. 以上から, $(x, y) = (1, 2)$ が連立方程式 $f(x, y) = g(x, y) = 0$ の解の全てである.

補題 2 と定理 8 から, $a_m(\beta) \neq 0$ かつ $b_n(\beta) \neq 0$ なら $\text{resul}_x(f, g)(y) = 0$ の解 $y = \beta$ を $f(x, y) = g(x, y) = 0$ の解 $(x, y) = (\alpha, \beta)$ に拡張できるが, この条件は弱められる.

定理 9 (解の拡張定理). $\text{resul}_x(f, g)(\beta) = 0$ のとき, $a_m(\beta) \neq 0$ または $b_n(\beta) \neq 0$ なら $f(\alpha, \beta) = g(\alpha, \beta) = 0$ となる $\alpha \in \bar{k}$ が存在する.

証明. $b_n(\beta) \neq 0$ のときも同様なので, $a_m(\beta) \neq 0$ とし, $k = \deg(g(x, \beta))$ とする.

$k = -\infty$ ($\Leftrightarrow g(x, \beta) = 0$) のとき, $\text{resul}(f(x, \beta), 0) = 0$ なので, 定理 8 から従う.

$k = 0$ ($\Leftrightarrow g(x, \beta) = b_0(\beta) \neq 0$) とはならない. 実際, $a_m(\beta) \neq 0$ かつ $b_n(\beta) = b_0(\beta) \neq 0$ なので補題 2 から $\text{resul}_x(f, g)(\beta) = \text{resul}(f(x, \beta), g(x, \beta))$ だが, 終結式の定義から $\text{resul}(f(x, \beta), g(x, \beta)) \text{resul}(f(x, \beta), b_0(\beta)) = a_m(\beta)^n \neq 0$ である.

以下, $k \geq 1$ とする. このとき, $\text{resul}_x(f, g)(\beta) = a_m(\beta)^{n-k} \text{resul}(f(x, \beta), g(x, \beta))$ が成り立つ. 実際, 例えば $m = 4, n = 3, k = 1$ の場合では

$$\begin{aligned} \text{resul}_x(f, g)(\beta) &= \begin{vmatrix} a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 \\ 0 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 \\ 0 & 0 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 \end{vmatrix} \\ &= a_4^2 \begin{vmatrix} a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ b_1 & b_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & b_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 \end{vmatrix} = a_4^2 \text{resul}(f(x, \beta), g(x, \beta)) \end{aligned}$$

となる. $a_m(\beta) \neq 0$ なので, これより $\text{resul}_x(f, g)(\beta) = \text{resul}(f(x, \beta), g(x, \beta)) = 0$ だから, 定理 8 より従う. \square

例 9. $f(x, y) = (y - 1)x^2 - x + y$, $g(x, y) = yx - 1$ とする.

$$\text{resul}_x(f, g)(y) = y^3 - 1 = (y - 1)(y - \omega)(y - \omega^2) \quad (\omega = \exp(2\pi i/3))$$

である. この根 $y = 1$ を $f(x, y)$ の x に関する最高次係数 $a_2(y) = y - 1$ に代入すると $a_2(1) = 0$ となるが, $g(x, y)$ の最高次係数 $b_1(y) = y$ に代入しても $b_1(1) = 1 \neq 0$ なので定理 9 からこの $y = 1$ を連立方程式 $f(x, y) = g(x, y) = 0$ の解に拡張できる. 実際,

$$f(x, 1) = -x + 1, \quad g(x, 1) = x - 1$$

なので, $(x, y) = (1, 1)$ が $f(x, y) = g(x, y) = 0$ の解である.

$$\text{Syl}_x(f, g)(y) = \begin{bmatrix} y - 1 & -1 & y \\ y & -1 & 0 \\ 0 & y & -1 \end{bmatrix}$$

なので, $y = 1$ を代入して行列式をとれば

$$\det(\text{Syl}_x(f, g)(1)) = \text{resul}_x(f, g)(1) = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -1 \times \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = 0$$

となるが, 最後の 2 次の行列式が $f(x, 1)$ と $g(x, 1)$ の終結式である.

$$\text{resul}(f(x, 1), g(x, 1)) = \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = 0$$

なお, $\text{resul}_x(f, g)(y) = 0$ の残りの解 $y = \omega, \omega^2$ を拡張すれば, 連立方程式 $f(x, y) = g(x, y) = 0$ の残りの解 $(x, y) = (\omega, \omega^2), (\omega^2, \omega)$ が得られる.

参考文献

- [1] 長坂工作・岩根秀直 (編), 『計算機代数の基礎理論』, 共立出版 (2020).
- [2] 三宅敏恒, 『線形代数概論』, 培風館 (2023).
- [3] 横山和弘, 『多項式と計算機代数』, 朝倉書店 (2022).
- [4] D. A. Cox, J. Little and D. O'Shea, *Ideals Varieties, and Algorithms 4th edition*, Springer (2015).
- [5] S. Lang, *Algebra Revised 3rd edition*, Springer (2004).