

離散数理工学 第 4 回

数え上げの基礎：漸化式の解き方 (発展)

岡本 吉央

okamotoy@uec.ac.jp

電気通信大学

2022 年 11 月 8 日

最終更新：2022 年 11 月 13 日 21:19

今日の目標

母関数を用いて漸化式を解けるようになる

- ▶ 線形漸化式の解法
- ▶ より複雑な漸化式の解法

目次

- ① 母関数 (復習)
- ② 線形漸化式の厳密解法
- ③ より複雑な漸化式の解法
- ④ 周期的な数列の一般項
- ⑤ 母関数が収束しない場合
- ⑥ 今日のまとめ

数列の母関数

定義：母関数とは？

数列 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \dots$ の **母関数** とは冪級数

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$$

のこと (x は複素数)

仮定

この冪級数は (絶対) 収束する

▶ 特に, ある定数 $r > 0$ が存在して $|x| < r$ のとき収束するとする

▶ つまり, $|x| < r$ のとき, $x \mapsto \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ は well-defined

収束するので、『微分積分学』, 『解析学』, 『複素関数論』の知識が使える

代表的な数列の母関数

| 数列 $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots$ | 一般項 a_n | 母関数 $A(x)$ |
|--|------------|------------------------|
| $1, 1, 1, 1, \dots$ | 1 | $\frac{1}{1-x}$ |
| $1, 2, 4, 8, \dots$ | 2^n | $\frac{1}{1-2x}$ |
| $1, \alpha, \alpha^2, \alpha^3, \dots$ | α^n | $\frac{1}{1-\alpha x}$ |
| $0, 1, 2, 3, \dots$ | n | $\frac{x}{(1-x)^2}$ |

目次

- ① 母関数 (復習)
- ② 線形漸化式の厳密解法
- ③ より複雑な漸化式の解法
- ④ 周期的な数列の一般項
- ⑤ 母関数が収束しない場合
- ⑥ 今日のまとめ

$a_n =$ グラフ P_n における独立集合の総数 とする

漸化式

$$a_n = \begin{cases} 2 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 3 & (n = 2 \text{ のとき}) \\ a_{n-1} + a_{n-2} & (n \geq 3 \text{ のとき}) \end{cases}$$

これを解いてみる

- ▶ 特性方程式を用いた方法 (前回)
- ▶ 行列を用いた方法 (前回)
- ▶ 母関数を用いた方法 (今回)

母関数を用いた漸化式の解法

0 a_0 を便宜上定める

漸化式

$$a_n = \begin{cases} 2 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 3 & (n = 2 \text{ のとき}) \\ a_{n-1} + a_{n-2} & (n \geq 3 \text{ のとき}) \end{cases}$$

母関数を用いた漸化式の解法

0 a_0 を便宜上定める

漸化式

$$a_n = \begin{cases} 2 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 3 & (n = 2 \text{ のとき}) \\ a_{n-1} + a_{n-2} & (n \geq 3 \text{ のとき}) \end{cases}$$

$a_0 = 1$ とする

▶ このとき, $a_2 = 3 = 2 + 1 = a_1 + a_0$

母関数を用いた漸化式の解法

0 a_0 を便宜上定める

漸化式

$$a_n = \begin{cases} 2 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 3 & (n = 2 \text{ のとき}) \\ a_{n-1} + a_{n-2} & (n \geq 3 \text{ のとき}) \end{cases}$$

$a_0 = 1$ とする

- ▶ このとき, $a_2 = 3 = 2 + 1 = a_1 + a_0$
- ▶ つまり, 上の漸化式は $n \geq 2$ において成立

書き換えた漸化式

$$a_n = \begin{cases} 1 & (n = 0 \text{ のとき}) \\ 2 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ a_{n-1} + a_{n-2} & (n \geq 2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

母関数を用いた漸化式の解法

1 両辺に x^n を掛けて、級数を作る

$n \geq 2$ のとき

$$a_n = a_{n-1} + a_{n-2}$$

母関数を用いた漸化式の解法

1 両辺に x^n を掛けて、級数を作る

$n \geq 2$ のとき

$$\begin{aligned} a_n &= a_{n-1} + a_{n-2} \\ \therefore a_n x^n &= a_{n-1} x^n + a_{n-2} x^n \end{aligned}$$

母関数を用いた漸化式の解法

1 両辺に x^n を掛けて、級数を作る

$n \geq 2$ のとき

$$\begin{aligned} a_n &= a_{n-1} + a_{n-2} \\ \therefore a_n x^n &= a_{n-1} x^n + a_{n-2} x^n \end{aligned}$$

したがって、

$$\sum_{n=2}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-1} x^n + \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2} x^n$$

母関数を用いた漸化式の解法

1 両辺に x^n を掛けて、級数を作る

$n \geq 2$ のとき

$$\begin{aligned} a_n &= a_{n-1} + a_{n-2} \\ \therefore a_n x^n &= a_{n-1} x^n + a_{n-2} x^n \end{aligned}$$

したがって、

$$\sum_{n=2}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-1} x^n + \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2} x^n$$

母関数を $A(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ と書くことにする

母関数を用いた漸化式の解法

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n=2}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-1} x^n + \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2} x^n$$

母関数を用いた漸化式の解法

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n=2}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-1} x^n + \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2} x^n$$
$$\text{左辺} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - a_0 - a_1 x$$

母関数を用いた漸化式の解法

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n=2}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-1} x^n + \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2} x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - a_0 - a_1 x = A(x) - 1 - 2x$$

母関数を用いた漸化式の解法

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n=2}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-1} x^n + \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2} x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - a_0 - a_1 x = A(x) - 1 - 2x$$

$$\text{右辺} = \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^{n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+2}$$

母関数を用いた漸化式の解法

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n=2}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-1} x^n + \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2} x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - a_0 - a_1 x = A(x) - 1 - 2x$$

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^{n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+2} \\ &= x \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - a_0 \right) + x^2 \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \right) \end{aligned}$$

母関数を用いた漸化式の解法

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n=2}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-1} x^n + \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2} x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - a_0 - a_1 x = A(x) - 1 - 2x$$

$$\text{右辺} = \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^{n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+2}$$

$$= x \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - a_0 \right) + x^2 \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \right)$$

$$= xA(x) - x + x^2A(x)$$

母関数を用いた漸化式の解法

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$A(x) - 1 - 2x = xA(x) - x + x^2A(x)$$

母関数を用いた漸化式の解法

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned} A(x) - 1 - 2x &= xA(x) - x + x^2A(x) \\ \therefore (x^2 + x - 1)A(x) &= -x - 1 \end{aligned}$$

母関数を用いた漸化式の解法

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned} A(x) - 1 - 2x &= xA(x) - x + x^2A(x) \\ \therefore (x^2 + x - 1)A(x) &= -x - 1 \\ \therefore A(x) &= -\frac{x + 1}{x^2 + x - 1} \end{aligned}$$

母関数を用いた漸化式の解法

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned}A(x) - 1 - 2x &= xA(x) - x + x^2A(x) \\ \therefore (x^2 + x - 1)A(x) &= -x - 1 \\ \therefore A(x) &= -\frac{x + 1}{x^2 + x - 1}\end{aligned}$$

$A(x)$ を x の有理関数として表現できた

母関数を用いた漸化式の解法

3 得られた $A(x)$ の級数展開を導く

$$A(x) = -\frac{x+1}{x^2+x-1}$$

母関数を用いた漸化式の解法

3 得られた $A(x)$ の級数展開を導く

$$A(x) = -\frac{x+1}{x^2+x-1}$$

このとき, $-\frac{x+1}{x^2+x-1}$ の部分分数展開が必要

- ▶ 「分母 = 0」を x について解くと, $x = \frac{-1 \pm \sqrt{5}}{2}$ となる
- ▶ したがって, ある定数 a, b が存在して

$$-\frac{x+1}{x^2+x-1} = \frac{a}{x - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}} + \frac{b}{x - \frac{-1-\sqrt{5}}{2}}$$

- ▶ この a, b を定める (次のページ)

母関数を用いた漸化式の解法

$$-\frac{x+1}{x^2+x-1} = \frac{a}{x - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}} + \frac{b}{x - \frac{-1-\sqrt{5}}{2}}$$

母関数を用いた漸化式の解法

$$-\frac{x+1}{x^2+x-1} = \frac{a}{x - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}} + \frac{b}{x - \frac{-1-\sqrt{5}}{2}}$$
$$\therefore -(x+1) = a \left(x - \frac{-1-\sqrt{5}}{2} \right) + b \left(x - \frac{-1+\sqrt{5}}{2} \right)$$

母関数を用いた漸化式の解法

$$-\frac{x+1}{x^2+x-1} = \frac{a}{x - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}} + \frac{b}{x - \frac{-1-\sqrt{5}}{2}}$$

$$\therefore -(x+1) = a \left(x - \frac{-1-\sqrt{5}}{2} \right) + b \left(x - \frac{-1+\sqrt{5}}{2} \right)$$

$$\therefore -x-1 = (a+b)x + \left(-\frac{-1-\sqrt{5}}{2}a - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}b \right)$$

母関数を用いた漸化式の解法

$$-\frac{x+1}{x^2+x-1} = \frac{a}{x - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}} + \frac{b}{x - \frac{-1-\sqrt{5}}{2}}$$

$$\therefore -(x+1) = a \left(x - \frac{-1-\sqrt{5}}{2} \right) + b \left(x - \frac{-1+\sqrt{5}}{2} \right)$$

$$\therefore -x-1 = (a+b)x + \left(-\frac{-1-\sqrt{5}}{2}a - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}b \right)$$

したがって,

$$-1 = a+b \quad \text{かつ}$$

$$-1 = -\frac{-1-\sqrt{5}}{2}a - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}b$$

母関数を用いた漸化式の解法

$$-\frac{x+1}{x^2+x-1} = \frac{a}{x - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}} + \frac{b}{x - \frac{-1-\sqrt{5}}{2}}$$

$$\therefore -(x+1) = a \left(x - \frac{-1-\sqrt{5}}{2} \right) + b \left(x - \frac{-1+\sqrt{5}}{2} \right)$$

$$\therefore -x-1 = (a+b)x + \left(-\frac{-1-\sqrt{5}}{2}a - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}b \right)$$

したがって,

$$-1 = a+b \quad \text{かつ}$$

$$-1 = -\frac{-1-\sqrt{5}}{2}a - \frac{-1+\sqrt{5}}{2}b$$

これを a, b に関して解くと

$$a = \frac{-5-\sqrt{5}}{10}, \quad b = \frac{-5+\sqrt{5}}{10}$$

母関数を用いた漸化式の解法

したがって,

$$A(x) = -\frac{x+1}{x^2+x-1} = -\frac{5+\sqrt{5}}{10} \frac{1}{x-\frac{-1+\sqrt{5}}{2}} - \frac{5-\sqrt{5}}{10} \frac{1}{x-\frac{-1-\sqrt{5}}{2}}$$



母関数を用いた漸化式の解法

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= -\frac{x+1}{x^2+x-1} = -\frac{5+\sqrt{5}}{10} \frac{1}{x-\frac{-1+\sqrt{5}}{2}} - \frac{5-\sqrt{5}}{10} \frac{1}{x-\frac{-1-\sqrt{5}}{2}} \\
 &= \frac{5+3\sqrt{5}}{10} \frac{1}{1-\frac{1+\sqrt{5}}{2}x} + \frac{5-3\sqrt{5}}{10} \frac{1}{1-\frac{1-\sqrt{5}}{2}x}
 \end{aligned}$$



母関数を用いた漸化式の解法

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= -\frac{x+1}{x^2+x-1} = -\frac{5+\sqrt{5}}{10} \frac{1}{x-\frac{-1+\sqrt{5}}{2}} - \frac{5-\sqrt{5}}{10} \frac{1}{x-\frac{-1-\sqrt{5}}{2}} \\
 &= \frac{5+3\sqrt{5}}{10} \frac{1}{1-\frac{1+\sqrt{5}}{2}x} + \frac{5-3\sqrt{5}}{10} \frac{1}{1-\frac{1-\sqrt{5}}{2}x} \\
 &= \frac{5+3\sqrt{5}}{10} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n x^n + \frac{5-3\sqrt{5}}{10} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n x^n
 \end{aligned}$$



母関数を用いた漸化式の解法

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{x+1}{x^2+x-1} = -\frac{5+\sqrt{5}}{10} \frac{1}{x-\frac{-1+\sqrt{5}}{2}} - \frac{5-\sqrt{5}}{10} \frac{1}{x-\frac{-1-\sqrt{5}}{2}} \\
 &= \frac{5+3\sqrt{5}}{10} \frac{1}{1-\frac{1+\sqrt{5}}{2}x} + \frac{5-3\sqrt{5}}{10} \frac{1}{1-\frac{1-\sqrt{5}}{2}x} \\
 &= \frac{5+3\sqrt{5}}{10} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n x^n + \frac{5-3\sqrt{5}}{10} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n x^n \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{5+3\sqrt{5}}{10} \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n + \frac{5-3\sqrt{5}}{10} \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n \right) x^n
 \end{aligned}$$

□

母関数を用いた漸化式の解法

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{x+1}{x^2+x-1} = -\frac{5+\sqrt{5}}{10} \frac{1}{x-\frac{-1+\sqrt{5}}{2}} - \frac{5-\sqrt{5}}{10} \frac{1}{x-\frac{-1-\sqrt{5}}{2}} \\
 &= \frac{5+3\sqrt{5}}{10} \frac{1}{1-\frac{1+\sqrt{5}}{2}x} + \frac{5-3\sqrt{5}}{10} \frac{1}{1-\frac{1-\sqrt{5}}{2}x} \\
 &= \frac{5+3\sqrt{5}}{10} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n x^n + \frac{5-3\sqrt{5}}{10} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n x^n \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{5+3\sqrt{5}}{10} \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n + \frac{5-3\sqrt{5}}{10} \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n \right) x^n
 \end{aligned}$$

したがって, 任意の $n \geq 0$ に対して,

$$a_n = \frac{5+3\sqrt{5}}{10} \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n + \frac{5-3\sqrt{5}}{10} \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n \quad \square$$

目次

- ① 母関数 (復習)
- ② 線形漸化式の厳密解法
- ③ より複雑な漸化式の解法
- ④ 周期的な数列の一般項
- ⑤ 母関数が収束しない場合
- ⑥ 今日のまとめ

例題 1

例題 1

$$a_n = \begin{cases} 3 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 4a_{n-1} - 3^{n-1} & (n \geq 2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

これを解いてみる

例題 1 : 直感を得る

例題 1

$$a_n = \begin{cases} 3 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 4a_{n-1} - 3^{n-1} & (n \geq 2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

- ▶ $a_1 = 3$
- ▶ $a_2 = 4a_1 - 3^{2-1} = 4 \cdot 3 - 3^1 = 12 - 3 = 9$
- ▶ $a_3 = 4a_2 - 3^{3-1} = 4 \cdot 9 - 3^2 = 36 - 9 = 27$
- ▶ $a_4 = 4a_3 - 3^{4-1} = 4 \cdot 27 - 3^3 = 108 - 27 = 81$
- ▶ ...

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 0

0 a_0 を便宜上定める

例題 1

$$a_n = \begin{cases} 3 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 4a_{n-1} - 3^{n-1} & (n \geq 2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 0

0 a_0 を便宜上定める

例題 1

$$a_n = \begin{cases} 3 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 4a_{n-1} - 3^{n-1} & (n \geq 2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

 $a_0 = 1$ とする

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 0

0 a_0 を便宜上定める

例題 1

$$a_n = \begin{cases} 3 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 4a_{n-1} - 3^{n-1} & (n \geq 2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

 $a_0 = 1$ とする

▶ このとき, $a_1 = 3 = 4 \cdot 1 - 1 = 4a_0 - 3^0 = 4a_{1-1} - 3^{1-1}$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 0

0 a_0 を便宜上定める

例題 1

$$a_n = \begin{cases} 3 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 4a_{n-1} - 3^{n-1} & (n \geq 2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

$a_0 = 1$ とする

▶ このとき, $a_1 = 3 = 4 \cdot 1 - 1 = 4a_0 - 3^0 = 4a_{1-1} - 3^{1-1}$
したがって, 考えている漸化式は次のように書き換えられる

例題 1 : 書き換えた漸化式

$$a_n = \begin{cases} 1 & (n = 0 \text{ のとき}) \\ 4a_{n-1} - 3^{n-1} & (n \geq 1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 1

1 両辺に x^n を掛けて, 級数を作る

$n \geq 1$ のとき

$$a_n = 4a_{n-1} - 3^{n-1}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 1

1 両辺に x^n を掛けて, 級数を作る

$n \geq 1$ のとき

$$\begin{aligned} a_n &= 4a_{n-1} - 3^{n-1} \\ \therefore a_n x^n &= 4a_{n-1} x^n - 3^{n-1} x^n \end{aligned}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 1

1 両辺に x^n を掛けて, 級数を作る

$n \geq 1$ のとき

$$\begin{aligned} a_n &= 4a_{n-1} - 3^{n-1} \\ \therefore a_n x^n &= 4a_{n-1} x^n - 3^{n-1} x^n \end{aligned}$$

したがって,

$$\sum_{n \geq 1} a_n x^n = \sum_{n \geq 1} 4a_{n-1} x^n - \sum_{n \geq 1} 3^{n-1} x^n$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 1

1 両辺に x^n を掛けて、級数を作る

$n \geq 1$ のとき

$$\begin{aligned} a_n &= 4a_{n-1} - 3^{n-1} \\ \therefore a_n x^n &= 4a_{n-1} x^n - 3^{n-1} x^n \end{aligned}$$

したがって、

$$\sum_{n \geq 1} a_n x^n = \sum_{n \geq 1} 4a_{n-1} x^n - \sum_{n \geq 1} 3^{n-1} x^n$$

母関数を $A(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ と書くことにする

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n \geq 1} a_n x^n = \sum_{n \geq 1} 4a_{n-1} x^n - \sum_{n \geq 1} 3^{n-1} x^n$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\begin{aligned}\sum_{n \geq 1} a_n x^n &= \sum_{n \geq 1} 4a_{n-1} x^n - \sum_{n \geq 1} 3^{n-1} x^n \\ \text{左辺} &= \sum_{n \geq 0} a_n x^n - a_0 = A(x) - 1\end{aligned}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n \geq 1} a_n x^n = \sum_{n \geq 1} 4a_{n-1} x^n - \sum_{n \geq 1} 3^{n-1} x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n \geq 0} a_n x^n - a_0 = A(x) - 1$$

$$\text{右辺} = \sum_{n \geq 0} 4a_n x^{n+1} - \sum_{n \geq 0} 3^n x^{n+1}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n \geq 1} a_n x^n = \sum_{n \geq 1} 4a_{n-1} x^n - \sum_{n \geq 1} 3^{n-1} x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n \geq 0} a_n x^n - a_0 = A(x) - 1$$

$$\text{右辺} = \sum_{n \geq 0} 4a_n x^{n+1} - \sum_{n \geq 0} 3^n x^{n+1}$$

$$= 4x \sum_{n \geq 0} a_n x^n - x \sum_{n \geq 0} (3x)^n$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\begin{aligned} \sum_{n \geq 1} a_n x^n &= \sum_{n \geq 1} 4a_{n-1} x^n - \sum_{n \geq 1} 3^{n-1} x^n \\ \text{左辺} &= \sum_{n \geq 0} a_n x^n - a_0 = A(x) - 1 \\ \text{右辺} &= \sum_{n \geq 0} 4a_n x^{n+1} - \sum_{n \geq 0} 3^n x^{n+1} \\ &= 4x \sum_{n \geq 0} a_n x^n - x \sum_{n \geq 0} (3x)^n \\ &= 4xA(x) - \frac{x}{1-3x} \end{aligned}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$A(x) - 1 = 4xA(x) - \frac{x}{1 - 3x}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned}A(x) - 1 &= 4xA(x) - \frac{x}{1-3x} \\ \therefore (1-4x)A(x) &= 1 - \frac{x}{1-3x}\end{aligned}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$A(x) - 1 = 4xA(x) - \frac{x}{1-3x}$$

$$\therefore (1-4x)A(x) = 1 - \frac{x}{1-3x}$$

$$\therefore A(x) = \frac{1}{1-4x} - \frac{x}{(1-3x)(1-4x)}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned}A(x) - 1 &= 4xA(x) - \frac{x}{1-3x} \\ \therefore (1-4x)A(x) &= 1 - \frac{x}{1-3x} \\ \therefore A(x) &= \frac{1}{1-4x} - \frac{x}{(1-3x)(1-4x)} \\ &= \frac{1-3x}{(1-3x)(1-4x)} - \frac{x}{(1-3x)(1-4x)}\end{aligned}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned}
 A(x) - 1 &= 4xA(x) - \frac{x}{1-3x} \\
 \therefore (1-4x)A(x) &= 1 - \frac{x}{1-3x} \\
 \therefore A(x) &= \frac{1}{1-4x} - \frac{x}{(1-3x)(1-4x)} \\
 &= \frac{1-3x}{(1-3x)(1-4x)} - \frac{x}{(1-3x)(1-4x)} \\
 &= \frac{1-4x}{(1-3x)(1-4x)} = \frac{1}{1-3x}
 \end{aligned}$$

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned}
 A(x) - 1 &= 4xA(x) - \frac{x}{1-3x} \\
 \therefore (1-4x)A(x) &= 1 - \frac{x}{1-3x} \\
 \therefore A(x) &= \frac{1}{1-4x} - \frac{x}{(1-3x)(1-4x)} \\
 &= \frac{1-3x}{(1-3x)(1-4x)} - \frac{x}{(1-3x)(1-4x)} \\
 &= \frac{1-4x}{(1-3x)(1-4x)} = \frac{1}{1-3x}
 \end{aligned}$$

$A(x)$ を x の有理関数として表現できた

例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 4

4 得られた $A(x)$ の級数展開を導く

$$A(x) = \frac{1}{1 - 3x}$$



例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 4

4 得られた $A(x)$ の級数展開を導く

$$A(x) = \frac{1}{1 - 3x}$$

したがって,

$$A(x) = \sum_{n=0}^{\infty} 3^n x^n$$



例題 1 : 母関数を用いた解法 Step 4

4 得られた $A(x)$ の級数展開を導く

$$A(x) = \frac{1}{1 - 3x}$$

したがって,

$$A(x) = \sum_{n=0}^{\infty} 3^n x^n$$

したがって, 任意の $n \geq 0$ に対して

$$a_n = 3^n$$



例題 2

例題 2

$$a_n = \begin{cases} 1 & (n = 0 \text{ のとき}) \\ 3a_{n-1} + 2n & (n \geq 1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

これを解いてみる

例題 2 : 直感を得る

例題 2

$$a_n = \begin{cases} 1 & (n = 0 \text{ のとき}) \\ 3a_{n-1} + 2n & (n \geq 1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

- ▶ $a_0 = 1$
- ▶ $a_1 = 3a_0 + 2 \cdot 1 = 3 \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 5$
- ▶ $a_2 = 3a_1 + 2 \cdot 2 = 3 \cdot 5 + 2 \cdot 2 = 19$
- ▶ $a_3 = 3a_2 + 2 \cdot 3 = 3 \cdot 19 + 2 \cdot 3 = 63$
- ▶ $a_4 = 3a_3 + 2 \cdot 4 = 3 \cdot 63 + 2 \cdot 4 = 197$
- ▶ ...

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 1

1 両辺に x^n を掛けて, 級数を作る

$n \geq 1$ のとき

$$a_n = 3a_{n-1} + 2n$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 1

1 両辺に x^n を掛けて, 級数を作る

$n \geq 1$ のとき

$$\begin{aligned} a_n &= 3a_{n-1} + 2n \\ \therefore a_n x^n &= 3a_{n-1} x^n + 2n x^n \end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 1

1 両辺に x^n を掛けて、級数を作る

$n \geq 1$ のとき

$$\begin{aligned} a_n &= 3a_{n-1} + 2n \\ \therefore a_n x^n &= 3a_{n-1} x^n + 2n x^n \end{aligned}$$

したがって、

$$\sum_{n \geq 1} a_n x^n = \sum_{n \geq 1} 3a_{n-1} x^n + \sum_{n \geq 1} 2n x^n$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 1

1 両辺に x^n を掛けて, 級数を作る

$n \geq 1$ のとき

$$\begin{aligned} a_n &= 3a_{n-1} + 2n \\ \therefore a_n x^n &= 3a_{n-1} x^n + 2n x^n \end{aligned}$$

したがって,

$$\sum_{n \geq 1} a_n x^n = \sum_{n \geq 1} 3a_{n-1} x^n + \sum_{n \geq 1} 2n x^n$$

母関数を $A(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ と書くことにする

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n \geq 1} a_n x^n = \sum_{n \geq 1} 3a_{n-1} x^n + \sum_{n \geq 1} 2n x^n$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\begin{aligned}\sum_{n \geq 1} a_n x^n &= \sum_{n \geq 1} 3a_{n-1} x^n + \sum_{n \geq 1} 2n x^n \\ \text{左辺} &= \sum_{n \geq 0} a_n x^n - a_0 = A(x) - 1\end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n \geq 1} a_n x^n = \sum_{n \geq 1} 3a_{n-1} x^n + \sum_{n \geq 1} 2n x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n \geq 0} a_n x^n - a_0 = A(x) - 1$$

$$\text{右辺} = \sum_{n \geq 0} 3a_n x^{n+1} + \sum_{n \geq 0} (2n + 2) x^{n+1}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $A(x)$ によって表す

$$\sum_{n \geq 1} a_n x^n = \sum_{n \geq 1} 3a_{n-1} x^n + \sum_{n \geq 1} 2n x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n \geq 0} a_n x^n - a_0 = A(x) - 1$$

$$\text{右辺} = \sum_{n \geq 0} 3a_n x^{n+1} + \sum_{n \geq 0} (2n + 2)x^{n+1}$$

$$= 3x \sum_{n \geq 0} a_n x^n + 2x \sum_{n \geq 0} n x^n + 2x \sum_{n \geq 0} x^n$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 2 (続き)

右辺の整理 (続き)

$$\text{右辺} = 3x \sum_{n \geq 0} a_n x^n + 2x \sum_{n \geq 0} n x^n + 2x \sum_{n \geq 0} x^n$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 2 (続き)

右辺の整理 (続き)

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= 3x \sum_{n \geq 0} a_n x^n + 2x \sum_{n \geq 0} n x^n + 2x \sum_{n \geq 0} x^n \\ &= 3x A(x) + 2x \frac{x}{(1-x)^2} + 2x \frac{1}{1-x} \end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 2 (続き)

右辺の整理 (続き)

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= 3x \sum_{n \geq 0} a_n x^n + 2x \sum_{n \geq 0} n x^n + 2x \sum_{n \geq 0} x^n \\ &= 3xA(x) + 2x \frac{x}{(1-x)^2} + 2x \frac{1}{1-x} \\ &= 3xA(x) + \frac{2x^2}{(1-x)^2} + \frac{2x(1-x)}{(1-x)^2} \end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 2 (続き)

右辺の整理 (続き)

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= 3x \sum_{n \geq 0} a_n x^n + 2x \sum_{n \geq 0} n x^n + 2x \sum_{n \geq 0} x^n \\ &= 3xA(x) + 2x \frac{x}{(1-x)^2} + 2x \frac{1}{1-x} \\ &= 3xA(x) + \frac{2x^2}{(1-x)^2} + \frac{2x(1-x)}{(1-x)^2} \\ &= 3xA(x) + \frac{2x}{(1-x)^2} \end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$A(x) - 1 = 3xA(x) + \frac{2x}{(1-x)^2}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned}A(x) - 1 &= 3xA(x) + \frac{2x}{(1-x)^2} \\ \therefore (1-3x)A(x) &= 1 + \frac{2x}{(1-x)^2}\end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned}A(x) - 1 &= 3xA(x) + \frac{2x}{(1-x)^2} \\ \therefore (1-3x)A(x) &= 1 + \frac{2x}{(1-x)^2} \\ \therefore A(x) &= \frac{1}{1-3x} + \frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)}\end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $A(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned}A(x) - 1 &= 3xA(x) + \frac{2x}{(1-x)^2} \\ \therefore (1-3x)A(x) &= 1 + \frac{2x}{(1-x)^2} \\ \therefore A(x) &= \frac{1}{1-3x} + \frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)}\end{aligned}$$

$A(x)$ を x の有理関数として表現できた

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4

4 得られた $A(x)$ の級数展開を導く

$$A(x) = \frac{1}{1-3x} + \frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4

4 得られた $A(x)$ の級数展開を導く

$$A(x) = \frac{1}{1-3x} + \frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)}$$

部分分数展開を試みる, つまり

$$\frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)} = \frac{a}{1-x} + \frac{b}{(1-x)^2} + \frac{c}{1-3x}$$

となる a, b, c が一意に存在するので, それを定める (次のページ)

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 — 部分分数展開

$$\frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)} = \frac{a}{1-x} + \frac{b}{(1-x)^2} + \frac{c}{1-3x}$$

\therefore

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 — 部分分数展開

$$\begin{aligned}\frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)} &= \frac{a}{1-x} + \frac{b}{(1-x)^2} + \frac{c}{1-3x} \\ \therefore 2x &= a(1-x)(1-3x) + b(1-3x) + c(1-x)^2\end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 — 部分分数展開

$$\frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)} = \frac{a}{1-x} + \frac{b}{(1-x)^2} + \frac{c}{1-3x}$$
$$\therefore 2x = a(1-x)(1-3x) + b(1-3x) + c(1-x)^2$$

この式は任意の x に対して成り立つから

- ▶ $x = 0$ とすると, $0 = a + b + c$
- ▶ $x = 1$ とすると, $2 = -2b$
- ▶ $x = \frac{1}{3}$ とすると, $\frac{2}{3} = \frac{4}{9}c$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 — 部分分数展開

$$\frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)} = \frac{a}{1-x} + \frac{b}{(1-x)^2} + \frac{c}{1-3x}$$

$$\therefore 2x = a(1-x)(1-3x) + b(1-3x) + c(1-x)^2$$

この式は任意の x に対して成り立つから

- ▶ $x = 0$ とすると, $0 = a + b + c$
- ▶ $x = 1$ とすると, $2 = -2b$
- ▶ $x = \frac{1}{3}$ とすると, $\frac{2}{3} = \frac{4}{9}c$

したがって, $a = -\frac{1}{2}, b = -1, c = \frac{3}{2}$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 (続き)

したがって,

$$\begin{aligned} A(x) &= \frac{1}{1-3x} + \frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)} \\ &= \frac{1}{1-3x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{1}{(1-x)^2} + \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} \end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 (続き)

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{1}{1-3x} + \frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)} \\
 &= \frac{1}{1-3x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{1}{(1-x)^2} + \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} \\
 &= \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{1}{(1-x)^2}
 \end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 (続き)

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{1}{1-3x} + \frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)} \\
 &= \frac{1}{1-3x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{1}{(1-x)^2} + \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} \\
 &= \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{1}{(1-x)^2} \\
 &= \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \left(\frac{x}{(1-x)^2} + \frac{1}{1-x} \right)
 \end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 (続き)

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{1}{1-3x} + \frac{2x}{(1-x)^2(1-3x)} \\
 &= \frac{1}{1-3x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{1}{(1-x)^2} + \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} \\
 &= \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{1}{(1-x)^2} \\
 &= \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \left(\frac{x}{(1-x)^2} + \frac{1}{1-x} \right) \\
 &= \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{x}{(1-x)^2}
 \end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 (続き 2)

$$A(x) = \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{x}{(1-x)^2}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 (続き 2)

$$\begin{aligned} A(x) &= \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{x}{(1-x)^2} \\ &= \frac{5}{2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} 3^n x^n - \frac{3}{2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} x^n - \sum_{n=0}^{\infty} n x^n \end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 (続き 2)

$$\begin{aligned} A(x) &= \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{x}{(1-x)^2} \\ &= \frac{5}{2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} 3^n x^n - \frac{3}{2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} x^n - \sum_{n=0}^{\infty} n x^n \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{5}{2} \cdot 3^n - \frac{3}{2} - n \right) x^n \end{aligned}$$

例題 2 : 母関数を用いた解法 Step 4 (続き 2)

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{1-3x} - \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1-x} - \frac{x}{(1-x)^2} \\
 &= \frac{5}{2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} 3^n x^n - \frac{3}{2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} x^n - \sum_{n=0}^{\infty} n x^n \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{5}{2} \cdot 3^n - \frac{3}{2} - n \right) x^n
 \end{aligned}$$

したがって、任意の $n \geq 0$ に対して、 $a_n = \frac{5}{2} \cdot 3^n - n - \frac{3}{2}$

□

目次

- ① 母関数 (復習)
- ② 線形漸化式の厳密解法
- ③ より複雑な漸化式の解法
- ④ 周期的な数列の一般項
- ⑤ 母関数が収束しない場合
- ⑥ 今日のまとめ

例題 3

例題 3

整数 $n \geq 0$ に対して

$$a_n = \begin{cases} 1 & (n \bmod 3 = 0 \text{ のとき}) \\ 4 & (n \bmod 3 = 1 \text{ のとき}) \\ 3 & (n \bmod 3 = 2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

この数列の一般項 a_n を 1 つの閉じた式で表せるか？

例題 3 : 母関数を用いた解法 (1)

母関数を $A(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ と書くことにすると

$$\begin{aligned} A(x) &= 1 + 4x + 3x^2 + x^3 + 4x^4 + 3x^5 + x^6 + 4x^7 + 3x^8 + \dots \\ &= (1 + 4x + 3x^2)(1 + x^3 + x^6 + \dots) \\ &= (1 + 4x + 3x^2) \frac{1}{1 - x^3} \\ &= \frac{1 + 4x + 3x^2}{1 - x^3} \end{aligned}$$

$A(x)$ を x の有理関数として表現できた

例題 3 : 母関数を用いた解法 (2)

部分分数展開をするために、「分母 = 0」の解を求める

- ▶ $1 - x^3 = 0$ を解くと, $x = 1, \omega, \omega^2$ (ただし, $\omega = e^{2\pi i/3}$)

例題 3 : 母関数を用いた解法 (2)

部分分数展開をするために、「分母 = 0」の解を求める

▶ $1 - x^3 = 0$ を解くと, $x = 1, \omega, \omega^2$ (ただし, $\omega = e^{2\pi i/3}$)
したがって,

$$\frac{1 + 4x + 3x^2}{1 - x^3} = \frac{a}{1 - x} + \frac{b}{\omega - x} + \frac{c}{\omega^2 - x}$$

となる, a, b, c が一意に存在するので, それを定める

例題 3 : 母関数を用いた解法 (2)

部分分数展開をするために、「分母 = 0」の解を求める

▶ $1 - x^3 = 0$ を解くと, $x = 1, \omega, \omega^2$ (ただし, $\omega = e^{2\pi i/3}$)
したがって,

$$\frac{1 + 4x + 3x^2}{1 - x^3} = \frac{a}{1 - x} + \frac{b}{\omega - x} + \frac{c}{\omega^2 - x}$$

となる, a, b, c が一意に存在するので, それを定める

$1 - x^3 = (1 - x)(\omega - x)(\omega^2 - x)$ なので,

$$\begin{aligned} 1 + 4x + 3x^2 &= a(\omega - x)(\omega^2 - x) + b(1 - x)(\omega^2 - x) \\ &\quad + c(1 - x)(\omega - x) \end{aligned}$$

この式は任意の x に対して成り立つ

例題 3 : 母関数を用いた解法 (3)

$1 - x^3 = (1 - x)(\omega - x)(\omega^2 - x)$ なので,

$$1 + 4x + 3x^2 = a(\omega - x)(\omega^2 - x) + b(1 - x)(\omega^2 - x) + c(1 - x)(\omega - x)$$

この式は任意の x に対して成り立つ

- ▶ $x = 1$ とすると, $8 = a(\omega - 1)(\omega^2 - 1)$
- ▶ $x = \omega$ とすると, $1 + 4\omega + 3\omega^2 = b(1 - \omega)(\omega^2 - \omega)$
- ▶ $x = \omega^2$ とすると, $1 + 4\omega^2 + 3\omega^4 = c(1 - \omega^2)(\omega - \omega^2)$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (3)

$1 - x^3 = (1 - x)(\omega - x)(\omega^2 - x)$ なので,

$$1 + 4x + 3x^2 = a(\omega - x)(\omega^2 - x) + b(1 - x)(\omega^2 - x) + c(1 - x)(\omega - x)$$

この式は任意の x に対して成り立つ

- ▶ $x = 1$ とすると, $8 = a(\omega - 1)(\omega^2 - 1)$
- ▶ $x = \omega$ とすると, $1 + 4\omega + 3\omega^2 = b(1 - \omega)(\omega^2 - \omega)$
- ▶ $x = \omega^2$ とすると, $1 + 4\omega^2 + 3\omega^4 = c(1 - \omega^2)(\omega - \omega^2)$

したがって,

$$a = \frac{8}{(\omega - 1)(\omega^2 - 1)}, \quad b = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{(1 - \omega)(\omega^2 - \omega)}, \quad c = \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega^4}{(1 - \omega^2)(\omega - \omega^2)}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (4)

ここで, $\omega^3 = 1$ と $1 + \omega + \omega^2 = 0$ に注意すると,

$$a = \frac{8}{(\omega - 1)(\omega^2 - 1)} = \frac{8}{\omega^3 - \omega^2 + \omega + 1} = \frac{8}{1 - (-\omega - 1) - \omega + 1} = \frac{8}{3},$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (4)

ここで, $\omega^3 = 1$ と $1 + \omega + \omega^2 = 0$ に注意すると,

$$a = \frac{8}{(\omega - 1)(\omega^2 - 1)} = \frac{8}{\omega^3 - \omega^2 + \omega + 1} = \frac{8}{1 - (-\omega - 1) - \omega + 1} = \frac{8}{3},$$

$$b = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{(1 - \omega)(\omega^2 - \omega)} = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{-\omega(\omega^2 - 2\omega + 1)} = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{-\omega((-\omega - 1) - 2\omega + 1)}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (4)

ここで, $\omega^3 = 1$ と $1 + \omega + \omega^2 = 0$ に注意すると,

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{8}{(\omega - 1)(\omega^2 - 1)} = \frac{8}{\omega^3 - \omega^2 + \omega + 1} = \frac{8}{1 - (-\omega - 1) - \omega + 1} = \frac{8}{3}, \\
 b &= \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{(1 - \omega)(\omega^2 - \omega)} = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{-\omega(\omega^2 - 2\omega + 1)} = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{-\omega((-\omega - 1) - 2\omega + 1)} \\
 &= \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{3\omega^2} = \frac{\omega + 4\omega^2 + 3}{3} = \frac{\omega + 4(-\omega - 1) + 3}{3} = \frac{-1 - 3\omega}{3},
 \end{aligned}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (4)

ここで, $\omega^3 = 1$ と $1 + \omega + \omega^2 = 0$ に注意すると,

$$a = \frac{8}{(\omega - 1)(\omega^2 - 1)} = \frac{8}{\omega^3 - \omega^2 + \omega + 1} = \frac{8}{1 - (-\omega - 1) - \omega + 1} = \frac{8}{3},$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{(1 - \omega)(\omega^2 - \omega)} = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{-\omega(\omega^2 - 2\omega + 1)} = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{-\omega((-\omega - 1) - 2\omega + 1)} \\ &= \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{3\omega^2} = \frac{\omega + 4\omega^2 + 3}{3} = \frac{\omega + 4(-\omega - 1) + 3}{3} = \frac{-1 - 3\omega}{3}, \end{aligned}$$

$$c = \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega^4}{(1 - \omega^2)(\omega - \omega^2)} = \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega}{(1 - (-1 - \omega))(\omega - (-1 - \omega))}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (4)

ここで, $\omega^3 = 1$ と $1 + \omega + \omega^2 = 0$ に注意すると,

$$a = \frac{8}{(\omega - 1)(\omega^2 - 1)} = \frac{8}{\omega^3 - \omega^2 + \omega + 1} = \frac{8}{1 - (-\omega - 1) - \omega + 1} = \frac{8}{3},$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{(1 - \omega)(\omega^2 - \omega)} = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{-\omega(\omega^2 - 2\omega + 1)} = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{-\omega((-\omega - 1) - 2\omega + 1)} \\ &= \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{3\omega^2} = \frac{\omega + 4\omega^2 + 3}{3} = \frac{\omega + 4(-\omega - 1) + 3}{3} = \frac{-1 - 3\omega}{3}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega^4}{(1 - \omega^2)(\omega - \omega^2)} = \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega}{(1 - (-1 - \omega))(\omega - (-1 - \omega))} \\ &= \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega}{(2 + \omega)(1 + 2\omega)} = \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega}{2 + 5\omega + 2\omega^2} = \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega}{2 + 5\omega + 2(-1 - \omega)} \end{aligned}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (4)

ここで, $\omega^3 = 1$ と $1 + \omega + \omega^2 = 0$ に注意すると,

$$a = \frac{8}{(\omega - 1)(\omega^2 - 1)} = \frac{8}{\omega^3 - \omega^2 + \omega + 1} = \frac{8}{1 - (-\omega - 1) - \omega + 1} = \frac{8}{3},$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{(1 - \omega)(\omega^2 - \omega)} = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{-\omega(\omega^2 - 2\omega + 1)} = \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{-\omega((-\omega - 1) - 2\omega + 1)} \\ &= \frac{1 + 4\omega + 3\omega^2}{3\omega^2} = \frac{\omega + 4\omega^2 + 3}{3} = \frac{\omega + 4(-\omega - 1) + 3}{3} = \frac{-1 - 3\omega}{3}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega^4}{(1 - \omega^2)(\omega - \omega^2)} = \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega}{(1 - (-1 - \omega))(\omega - (-1 - \omega))} \\ &= \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega}{(2 + \omega)(1 + 2\omega)} = \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega}{2 + 5\omega + 2\omega^2} = \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega}{2 + 5\omega + 2(-1 - \omega)} \\ &= \frac{1 + 4\omega^2 + 3\omega}{3\omega} = \frac{\omega^2 + 4\omega + 3}{3} = \frac{(-1 - \omega) + 4\omega + 3}{3} = \frac{2 + 3\omega}{3} \end{aligned}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (5)

したがって,

$$A(x) = \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3} \frac{1}{\omega-x} + \frac{2+3\omega}{3} \frac{1}{\omega^2-x}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (5)

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3} \frac{1}{\omega-x} + \frac{2+3\omega}{3} \frac{1}{\omega^2-x} \\
 &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3\omega} \frac{1}{1-x/\omega} + \frac{2+3\omega}{3\omega^2} \frac{1}{1-x/\omega^2}
 \end{aligned}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (5)

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3} \frac{1}{\omega-x} + \frac{2+3\omega}{3} \frac{1}{\omega^2-x} \\
 &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3\omega} \frac{1}{1-x/\omega} + \frac{2+3\omega}{3\omega^2} \frac{1}{1-x/\omega^2} \\
 &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{2-\omega}{3} \frac{1}{1-x/\omega} - \frac{3+\omega}{3} \frac{1}{1-x/\omega^2}
 \end{aligned}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (5)

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3} \frac{1}{\omega-x} + \frac{2+3\omega}{3} \frac{1}{\omega^2-x} \\
 &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3\omega} \frac{1}{1-x/\omega} + \frac{2+3\omega}{3\omega^2} \frac{1}{1-x/\omega^2} \\
 &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{2-\omega}{3} \frac{1}{1-x/\omega} - \frac{3+\omega}{3} \frac{1}{1-x/\omega^2} \\
 &= \frac{8}{3} \sum_{n=0}^{\infty} x^n - \frac{2-\omega}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{\omega}\right)^n x^n - \frac{3+\omega}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{\omega^2}\right)^n x^n
 \end{aligned}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (5)

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3} \frac{1}{\omega-x} + \frac{2+3\omega}{3} \frac{1}{\omega^2-x} \\
 &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3\omega} \frac{1}{1-x/\omega} + \frac{2+3\omega}{3\omega^2} \frac{1}{1-x/\omega^2} \\
 &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{2-\omega}{3} \frac{1}{1-x/\omega} - \frac{3+\omega}{3} \frac{1}{1-x/\omega^2} \\
 &= \frac{8}{3} \sum_{n=0}^{\infty} x^n - \frac{2-\omega}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{\omega}\right)^n x^n - \frac{3+\omega}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{\omega^2}\right)^n x^n \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{8}{3} - \frac{2-\omega}{3} \left(\frac{1}{\omega}\right)^n - \frac{3+\omega}{3} \left(\frac{1}{\omega^2}\right)^n \right) x^n
 \end{aligned}$$

例題 3 : 母関数を用いた解法 (5)

したがって,

$$\begin{aligned}
 A(x) &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3} \frac{1}{\omega-x} + \frac{2+3\omega}{3} \frac{1}{\omega^2-x} \\
 &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{-1-3\omega}{3\omega} \frac{1}{1-x/\omega} + \frac{2+3\omega}{3\omega^2} \frac{1}{1-x/\omega^2} \\
 &= \frac{8}{3} \frac{1}{1-x} + \frac{2-\omega}{3} \frac{1}{1-x/\omega} - \frac{3+\omega}{3} \frac{1}{1-x/\omega^2} \\
 &= \frac{8}{3} \sum_{n=0}^{\infty} x^n - \frac{2-\omega}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{\omega}\right)^n x^n - \frac{3+\omega}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{\omega^2}\right)^n x^n \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{8}{3} - \frac{2-\omega}{3} \left(\frac{1}{\omega}\right)^n - \frac{3+\omega}{3} \left(\frac{1}{\omega^2}\right)^n \right) x^n \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{8}{3} - \frac{2-\omega}{3} \omega^{2n} - \frac{3+\omega}{3} \omega^n \right) x^n
 \end{aligned}$$

例題 3 : まとめ

例題 3

整数 $n \geq 0$ に対して

$$a_n = \begin{cases} 1 & (n \bmod 3 = 0 \text{ のとき}) \\ 4 & (n \bmod 3 = 1 \text{ のとき}) \\ 3 & (n \bmod 3 = 2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

この数列の一般項 a_n を 1 つの閉じた式で表せるか？

解答例

任意の整数 $n \geq 0$ に対して

$$a_n = \frac{8}{3} - \frac{2 - \omega}{3} \omega^{2n} - \frac{3 + \omega}{3} \omega^n$$

ただし, $\omega = e^{2\pi i/3}$

この記述を得ることを, **逆離散フーリエ変換** と呼ぶことがある

例題 3 : 確認

求めた一般項から、数列の各項を計算してみる

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{8}{3} - \frac{2-\omega}{3}\omega^0 - \frac{3+\omega}{3}\omega^0 \\
 &= \frac{8}{3} - \frac{2-\omega}{3} - \frac{3+\omega}{3} = 1 \\
 a_1 &= \frac{8}{3} - \frac{2-\omega}{3}\omega^2 - \frac{3+\omega}{3}\omega^1 \\
 &= \frac{8}{3} - \frac{2}{3}\omega^2 + \frac{1}{3} - \omega - \frac{1}{3}\omega^2 = 3 - \omega^2 - \omega \\
 &= 4 \\
 a_2 &= \frac{8}{3} - \frac{2-\omega}{3}\omega^4 - \frac{3+\omega}{3}\omega^2 \\
 &= \frac{8}{3} - \frac{2}{3}\omega + \frac{1}{3}\omega^2 - \omega^2 - \frac{1}{3} = \frac{7}{3} - \frac{2}{3}\omega - \frac{2}{3}\omega^2 \\
 &= \frac{7}{3} + \frac{2}{3} = 3
 \end{aligned}$$

目次

- ① 母関数 (復習)
- ② 線形漸化式の厳密解法
- ③ より複雑な漸化式の解法
- ④ 周期的な数列の一般項
- ⑤ 母関数が収束しない場合**
- ⑥ 今日のまとめ

例題 4

例題 4

$$a_n = \begin{cases} 4 & (n = 0 \text{ のとき}) \\ na_{n-1} + 3n - 2 & (n \geq 1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

これを解きたい

例題 4

例題 4

$$a_n = \begin{cases} 4 & (n = 0 \text{ のとき}) \\ na_{n-1} + 3n - 2 & (n \geq 1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

これを解きたい

問題点

級数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ は収束しない

実際, $n \geq 1$ のとき, $a_n = na_{n-1} + 3n - 2 > na_{n-1}$ であるので,

$$\left| \frac{a_n x^n}{a_{n-1} x^{n-1}} \right| > n|x|$$

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 1 の前に

a_n の代わりに, 次の b_n を考える

$$b_n = \frac{a_n}{n!}$$

そして, b_n の母関数 $B(x)$ を考える

$$B(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{n!} x^n$$

- ▶ $B(x)$ を, 数列 a_0, a_1, a_2, \dots の**指数型母関数**と呼ぶことがある
- ▶ 一方で, $A(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ を, 数列 a_0, a_1, a_2, \dots の**通常型母関数**と呼ぶことがある

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 1 の前に

例題 4

$$a_n = \begin{cases} 4 & (n = 0 \text{ のとき}) \\ na_{n-1} + 3n - 2 & (n \geq 1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

$$\downarrow \quad b_n = \frac{a_n}{n!} \quad \downarrow$$

例題 4 : 書き換え

$$b_n = \begin{cases} 4 & (n = 0 \text{ のとき}) \\ \frac{na_{n-1}}{n!} + \frac{3n}{n!} - \frac{2}{n!} = b_{n-1} + \frac{3}{(n-1)!} - \frac{2}{n!} & (n \geq 1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 1

1 両辺に x^n を掛けて, 級数を作る

$n \geq 1$ のとき

$$b_n = b_{n-1} + \frac{3}{(n-1)!} - \frac{2}{n!}$$

$$\therefore b_n x^n = b_{n-1} x^n + \frac{3}{(n-1)!} x^n - \frac{2}{n!} x^n$$

したがって,

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n x^n = \sum_{n=1}^{\infty} b_{n-1} x^n + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{(n-1)!} x^n - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n!} x^n$$

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $B(x)$ によって表す

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n x^n = \sum_{n=1}^{\infty} b_{n-1} x^n + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{(n-1)!} x^n - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n!} x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n - b_0 = B(x) - 4$$

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $B(x)$ によって表す

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n x^n = \sum_{n=1}^{\infty} b_{n-1} x^n + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{(n-1)!} x^n - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n!} x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n - b_0 = B(x) - 4$$

$$\text{右辺} = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^{n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3}{n!} x^{n+1} - \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{n!} x^n - \frac{2}{0!} \right)$$

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 2

2 各辺を $B(x)$ によって表す

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n x^n = \sum_{n=1}^{\infty} b_{n-1} x^n + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{(n-1)!} x^n - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n!} x^n$$

$$\text{左辺} = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n - b_0 = B(x) - 4$$

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^{n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3}{n!} x^{n+1} - \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{n!} x^n - \frac{2}{0!} \right) \\ &= xB(x) + 3xe^x - 2e^x + 2 \end{aligned}$$

復習 : テイラー展開

$$\text{任意の実数 } x \text{ に対して } e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n$$

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 3

3 得られた式を $B(x)$ に関して解く

$$\begin{aligned} B(x) - 4 &= xB(x) + 3xe^x - 2e^x + 2 \\ \therefore (1-x)B(x) &= 3xe^x - 2e^x + 6 \\ \therefore B(x) &= \frac{3x}{1-x}e^x - \frac{2}{1-x}e^x + \frac{6}{1-x} \\ &= \frac{-3(1-x) + 3}{1-x}e^x - \frac{2}{1-x}e^x + \frac{6}{1-x} \\ &= -3e^x + \frac{1}{1-x}e^x + \frac{6}{1-x} \end{aligned}$$

$B(x)$ を x の関数として表現できた

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 4

4 得られた $B(x)$ の級数展開を導く

$$B(x) = -3e^x + \frac{1}{1-x}e^x + \frac{6}{1-x}$$

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 4

4 得られた $B(x)$ の級数展開を導く

$$\begin{aligned} B(x) &= -3e^x + \frac{1}{1-x}e^x + \frac{6}{1-x} \\ &= -3 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n + \left(\sum_{k=0}^{\infty} x^k \right) \left(\sum_{\ell=0}^{\infty} \frac{1}{\ell!} x^\ell \right) + 6 \sum_{n=0}^{\infty} x^n \end{aligned}$$

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 4

4 得られた $B(x)$ の級数展開を導く

$$\begin{aligned}
 B(x) &= -3e^x + \frac{1}{1-x}e^x + \frac{6}{1-x} \\
 &= -3 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n + \left(\sum_{k=0}^{\infty} x^k \right) \left(\sum_{\ell=0}^{\infty} \frac{1}{\ell!} x^\ell \right) + 6 \sum_{n=0}^{\infty} x^n \\
 &= -3 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n + \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \right) x^n + 6 \sum_{n=0}^{\infty} x^n
 \end{aligned}$$

例題 4 : 母関数を用いた解法 Step 4

4 得られた $B(x)$ の級数展開を導く

$$\begin{aligned}
 B(x) &= -3e^x + \frac{1}{1-x}e^x + \frac{6}{1-x} \\
 &= -3 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n + \left(\sum_{k=0}^{\infty} x^k \right) \left(\sum_{\ell=0}^{\infty} \frac{1}{\ell!} x^\ell \right) + 6 \sum_{n=0}^{\infty} x^n \\
 &= -3 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n + \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \right) x^n + 6 \sum_{n=0}^{\infty} x^n \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(-\frac{3}{n!} + \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} + 6 \right) x^n
 \end{aligned}$$

したがって、任意の $n \geq 0$ に対して、 $b_n = 6 + \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} - \frac{3}{n!}$

例題 4 : 母関数を用いた解法 まとめ

 b_n の一般項

$$\text{任意の } n \geq 0 \text{ に対して, } b_n = 6 + \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} - \frac{3}{n!}$$

$$\downarrow \quad b_n = \frac{a_n}{n!} \quad \downarrow$$

 a_n の一般項

$$\text{任意の } n \geq 0 \text{ に対して, } a_n = 6n! + \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!} - 3$$

目次

- ① 母関数 (復習)
- ② 線形漸化式の厳密解法
- ③ より複雑な漸化式の解法
- ④ 周期的な数列の一般項
- ⑤ 母関数が収束しない場合
- ⑥ 今日のまとめ

今日の目標

今日の目標

母関数を用いて漸化式を解けるようになる

- ▶ 線形漸化式の解法
- ▶ より複雑な漸化式の解法

注意

今日扱ったのは、母関数に関する初歩

- ▶ 母関数にまつわる理論は膨大
- ▶ 近年では「解析的組合せ論」という分野に成長

ここでは、『複素関数論』が重要な役割を果たす

目次

- ① 母関数 (復習)
- ② 線形漸化式の厳密解法
- ③ より複雑な漸化式の解法
- ④ 周期的な数列の一般項
- ⑤ 母関数が収束しない場合
- ⑥ 今日のまとめ