

離散数学 第 14 回  
証明法 (4) : 数学的帰納法

岡本 吉央  
okamotoy@uec.ac.jp

電気通信大学

2015 年 7 月 17 日

最終更新 : 2015 年 7 月 16 日 14:02

岡本 吉央 (電通大)

離散数学 (14)

2015 年 7 月 17 日

1 / 47

スケジュール 後半 (予定)

- 10 関係 (1) : 関係 (6 月 19 日)
- 11 関係 (2) : 同値関係 (6 月 26 日)
- 12 関係 (3) : 順序関係 (7 月 3 日)
- 13 関係 (4) : 関係の閉包 (7 月 10 日)
- 14 証明法 (4) : 数学的帰納法 (7 月 17 日)
- 15 集合と論理 (5) : 集合の再帰的定義 (7 月 24 日)
  - 補講 (7 月 31 日?)
  - 期末試験 (8 月 7 日?)

注意 : 予定の変更もありうる

岡本 吉央 (電通大)

離散数学 (14)

2015 年 7 月 17 日

3 / 47

目次

- ① 数学的帰納法
- ② 再帰的定義
- ③ 今日のまとめ

岡本 吉央 (電通大)

離散数学 (14)

2015 年 7 月 17 日

5 / 47

例題 1 : 数学的帰納法による証明

例題 1 : 証明したいこと

任意の正の整数  $n$  に対して,  
 $8^n - 3^n$  が 5 で割り切れる  
ことを証明せよ.

数学的帰納法による証明 : 方針

- 1  $n = 1$  のときに正しいことを証明する
- 2 任意の正の整数  $k \geq 1$  に対して,  
 $n = k$  のときに正しいならば,  $n = k + 1$  のときに正しいことを証明する

岡本 吉央 (電通大)

離散数学 (14)

2015 年 7 月 17 日

7 / 47

スケジュール 前半

- 1 集合と論理 (1) : 命題論理 (4 月 10 日)
- 2 集合と論理 (2) : 集合と論理の対応 (4 月 17 日)
- 3 集合と論理 (3) : 述語論理 (4 月 24 日)
- 4 証明法 (1) :  $\exists$ と $\forall$ を含む命題の証明 (5 月 1 日)
- 5 証明法 (2) : 含意を含む命題の証明 (5 月 8 日)
- 6 集合と論理 (4) : 直積と冪集合 (5 月 15 日)
- 7 証明法 (3) : 集合に関する証明 (5 月 22 日)
- 8 写像 (1) : 像と逆像 (5 月 29 日)
- 9 写像 (2) : 全射と単射 (6 月 5 日)
  - 中間試験 (6 月 12 日)

注意 : 予定の変更もありうる

岡本 吉央 (電通大)

離散数学 (14)

2015 年 7 月 17 日

2 / 47

今日の概要

この講義の目標

- ▶ 語学としての数学, コミュニケーションとしての数学

今日の目標

- ▶ 数学的帰納法で証明ができるようになる
- ▶ 再帰的定義によって無限を扱う方法を理解する

岡本 吉央 (電通大)

離散数学 (14)

2015 年 7 月 17 日

4 / 47

例題 1

例題 1 : 証明したいこと

任意の正の整数  $n$  に対して,  
 $8^n - 3^n$  が 5 で割り切れる  
ことを証明せよ.

確認

- ▶  $n = 1$  のとき :  $8^n - 3^n = 8 - 3 = 5$
- ▶  $n = 2$  のとき :  $8^n - 3^n = 64 - 9 = 55 = 5 \times 11$
- ▶  $n = 3$  のとき :  $8^n - 3^n = 512 - 27 = 485 = 5 \times 97$
- ▶ ...

注 : これはただの確認であり, 証明ではない

岡本 吉央 (電通大)

離散数学 (14)

2015 年 7 月 17 日

6 / 47

例題 1 : 数学的帰納法による証明 (1)

例題 1 : 証明したいこと

任意の正の整数  $n$  に対して,  
 $8^n - 3^n$  が 5 で割り切れる  
ことを証明せよ.

証明 : まず  $n = 1$  のときに正しいことを証明する.

- ▶  $n = 1$  のとき,  $8^n - 3^n = 8 - 3 = 5$ .
- ▶ 5 は 5 で割り切れるので, このとき正しい.

岡本 吉央 (電通大)

離散数学 (14)

2015 年 7 月 17 日

8 / 47

例題 1 : 数学的帰納法による証明 (2)

例題 1 : 証明したいこと

任意の正の整数  $n$  に対して、  
 $8^n - 3^n$  が 5 で割り切れる  
 ことを証明せよ。

証明 (続) : 次に、任意の正の整数  $k \geq 1$  を考える。

- ▶  $8^k - 3^k$  が 5 で割り切れると仮定する。  
 (注 : 帰納法の仮定と呼ばれる)
- ▶ 証明すべきことは、 $8^{k+1} - 3^{k+1}$  が 5 で割り切れることである。
- ▶ 帰納法の仮定より、ある正の整数  $m$  が存在して、 $8^k - 3^k = 5m$  となる。

数学的帰納法とは？

数学的帰納法による証明法

「任意の正の整数  $n$  に対して、 $P(n)$ 」という形の命題の証明

- 1  $P(1)$  を証明 (基底段階)
- 2 「任意の正の整数  $k$  に対して『 $P(k)$  ならば  $P(k+1)$ 』」を証明 (帰納段階)

帰納段階での証明の書き方

- 1 「任意の正の整数  $k$  を考える」と書く
- 2 「 $P(k)$  であると仮定する」と書く
- 3  $P(k)$  を用いて、 $P(k+1)$  が正しいことを導く (証明する)

例題 1 では、

$$P(n) = \text{「}8^n - 3^n \text{ が 5 で割り切れる」}$$

数学的帰納法 : 論理に関する補足 (1)

数学的帰納法はなぜ正しいのか？

数学的帰納法による証明法

「任意の正の整数  $n$  に対して、 $P(n)$ 」という形の命題の証明

- 1  $P(1)$  を証明 (基底段階)
- 2 「任意の正の整数  $k$  に対して『 $P(k)$  ならば  $P(k+1)$ 』」を証明 (帰納段階)

つまり、正の整数を全部集めた集合を  $\mathbb{Z}_+$  として、  
 証明したいことは

$$\forall n \in \mathbb{Z}_+ (P(n))$$

数学的帰納法 : 論理に関する補足 (3)

数学的帰納法はなぜ正しいのか？

- ▶ 分かりにくいので、 $\mathbb{Z}_+$  を  $\{1, 2, 3\}$  に置きかえた場合を考える  
 $P(1) \wedge (\forall k \in \{1, 2, 3\} (P(k) \rightarrow P(k+1))) \Rightarrow \forall n \in \{1, 2, 3\} (P(n))$
- ▶ 書き換えると、  

$$P(1) \wedge (P(1) \rightarrow P(2)) \wedge (P(2) \rightarrow P(3)) \wedge (P(3) \rightarrow P(4))$$

$$\Rightarrow P(1) \wedge P(2) \wedge P(3)$$

これを推論で証明してみる

例題 1 : 数学的帰納法による証明 (2)

例題 1 : 証明したいこと

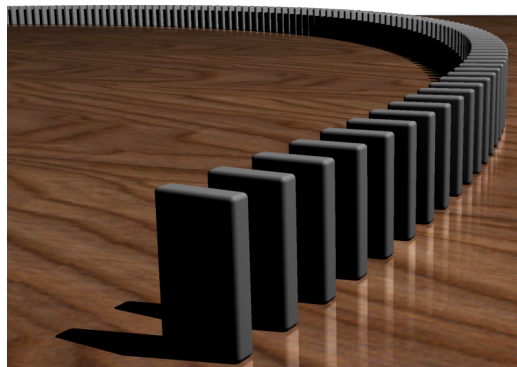
任意の正の整数  $n$  に対して、  
 $8^n - 3^n$  が 5 で割り切れる  
 ことを証明せよ。

証明 (続 2) : このとき、

$$\begin{aligned} 8^{k+1} - 3^{k+1} &= (5+3) \cdot 8^k - 3 \cdot 3^k \\ &= 5 \cdot 8^k + 3 \cdot (8^k - 3^k) \\ &= 5 \cdot 8^k + 3 \cdot 5m \quad (\text{帰納法の仮定から}) \\ &= 5 \cdot (8^k + 3m). \end{aligned}$$

$8^k + 3m$  は正の整数なので、 $8^{k+1} - 3^{k+1}$  は 5 で割り切れる。 □

数学的帰納法のイメージ



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Dominoeffect.png>

数学的帰納法 : 論理に関する補足 (2)

数学的帰納法はなぜ正しいのか？

数学的帰納法による証明法

「任意の正の整数  $n$  に対して、 $P(n)$ 」という形の命題の証明

- 1  $P(1)$  を証明 (基底段階)
- 2 「任意の正の整数  $k$  に対して『 $P(k)$  ならば  $P(k+1)$ 』」を証明 (帰納段階)

数学的帰納法による証明が主張していることは

$$\underbrace{P(1)}_1 \wedge \underbrace{(\forall k \in \mathbb{Z}_+ (P(k) \rightarrow P(k+1)))}_2 \Rightarrow \forall n \in \mathbb{Z}_+ (P(n))$$

数学的帰納法 : 論理に関する補足 (4)

証明すること

任意の命題  $P(1), P(2), P(3), P(4)$  に対して

$$\begin{aligned} (P(1) \wedge (P(1) \rightarrow P(2)) \wedge (P(2) \rightarrow P(3)) \wedge (P(3) \rightarrow P(4))) \\ \Rightarrow (P(1) \wedge P(2) \wedge P(3)) \end{aligned}$$

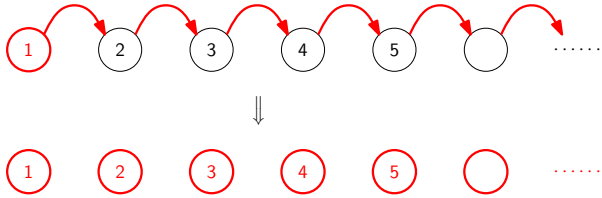
証明 :  $P(1), P(1) \rightarrow P(2), P(2) \rightarrow P(3), P(3) \rightarrow P(4)$  を仮定する

- ▶  $P(1)$  と  $P(1) \rightarrow P(2)$  より、 $P(2)$  は成り立つ。
- ▶  $P(2)$  が成り立つので、それと  $P(2) \rightarrow P(3)$  より、 $P(3)$  が成り立つ。
- ▶ したがって、 $P(1), P(2), P(3)$  はすべて成り立つ。 □

モードゥス・ポネンス (モーダス・ポネンス) (推論の類型 : 第 7 回講義)

任意の命題変数  $P, Q$  に対して

$$P \wedge (P \rightarrow Q) \Rightarrow Q$$



例題 2：数学的帰納法 (基底段階)

例題 2：証明したいこと

任意の正の整数  $n$  に対して

$$2n \leq 2^n$$

となることを証明せよ。

証明 (基底段階)：まず、 $n = 1$  のときに正しいことを証明する。

- ▶ 左辺 =  $2n = 2$ .
- ▶ 右辺 =  $2^n = 2$ .
- ▶ したがって、 $2n \leq 2^n$  であり、正しい。

例題 3：数学的帰納法の変種

例題 3：証明したいこと

3 以上の任意の正の整数  $n$  に対して

$$6n < 3^n$$

となることを証明せよ。

確認

- ▶  $n = 3$  のとき： $6n = 18 < 27 = 3^n$
- ▶  $n = 4$  のとき： $6n = 24 < 81 = 3^n$
- ▶  $n = 5$  のとき： $6n = 30 < 243 = 3^n$
- ▶ ...

注意：証明の方法

数学的帰納法を  $n = 1$  から始めず、 $n = 3$  から始める

例題 3：数学的帰納法の変種 (帰納段階)

例題 3：証明したいこと

3 以上の任意の正の整数  $n$  に対して

$$6n < 3^n$$

となることを証明せよ。

証明 (帰納段階)：次に、3 以上の任意の正整数  $k$  を考える。

- ▶  $6k < 3^k$  であると仮定する。
- ▶ 証明すべきことは、 $6(k+1) < 3^{k+1}$  である。
- ▶  $6(k+1) = 6k + 6$   
 $< 3^k + 3 + 3$  (帰納法の仮定から)  
 $< 3^k + 3^k + 3^k$  ( $k \geq 3$  であるから)  
 $= 3^{k+1}$ .

例題 2

例題 2：証明したいこと

任意の正の整数  $n$  に対して

$$2n \leq 2^n$$

となることを証明せよ。

確認

- ▶  $n = 1$  のとき： $2n = 2 \leq 2 = 2^n$
- ▶  $n = 2$  のとき： $2n = 4 \leq 4 = 2^n$
- ▶  $n = 3$  のとき： $2n = 6 \leq 8 = 2^n$
- ▶  $n = 4$  のとき： $2n = 8 \leq 16 = 2^n$
- ▶ ...

注：これはただの確認であり、証明ではない

例題 2：数学的帰納法 (帰納段階)

例題 2：証明したいこと

任意の正の整数  $n$  に対して

$$2n \leq 2^n$$

となることを証明せよ。

証明 (帰納段階)：次に、任意の正の整数  $k \geq 1$  を考える。

- ▶  $2k \leq 2^k$  であると仮定する。
- ▶ 証明すべきことは、 $2(k+1) \leq 2^{k+1}$  である。  
(コツ：↑これをしっかりと書くとよい)
- ▶  $2(k+1) = 2k + 2$   
 $\leq 2^k + 2$  (帰納法の仮定から)  
 $\leq 2^k + 2^k$  ( $k \geq 1$  であるから)  
 $= 2 \cdot 2^k = 2^{k+1}$

例題 3：数学的帰納法の変種 (基底段階)

例題 3：証明したいこと

3 以上の任意の正の整数  $n$  に対して

$$6n < 3^n$$

となることを証明せよ。

証明 (基底段階)：まず、 $n = 3$  のときに正しいことを証明する。

- ▶ 左辺 =  $6n = 18$ .
- ▶ 右辺 =  $3^n = 27$ .
- ▶ したがって、 $n = 3$  のとき  $6n < 3^n$  となり、正しい。

目次

- ① 数学的帰納法
- ② 再帰的定義
- ③ 今日のまとめ

次に来るのは何？

1, 3, 7, 13, 21, 31

 $n^2 + n + 1, n = 0, 1, 2, \dots$ 

- ▶ 「…」はあいまい

## 格言

情報科学の本質の1つは「『無意識』を意識すること」

## 階乗：再帰的定義

階乗とは？ (再帰的定義)

正の整数  $n$  に対して、 $n$  の階乗とは

$$n! = \begin{cases} 1 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ n \cdot (n-1)! & (n > 1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

のこと

実際の計算

- ▶  $n = 1$  のとき:  $1! = 1$
- ▶  $n = 2$  のとき:  $2! = 2 \cdot 1! = 2 \cdot 1 = 2$
- ▶  $n = 3$  のとき:  $3! = 3 \cdot 2! = 3 \cdot 2 = 6$
- ▶  $n = 4$  のとき:  $4! = 4 \cdot 3! = 4 \cdot 6 = 24$
- ▶ ...

## 例題 4：数学的帰納法による証明 (基底段階)

例題 4：証明したいこと

任意の正の整数  $n$  に対して、 $a_n$  を次のように定義する

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

このとき、任意の正の整数  $n$  に対して、

$$a_n = 2n - 1$$

となることを証明せよ

証明 (基底段階)：まず、 $n = 1$  のときを証明する。

- ▶ 左辺 =  $a_1 = 1$ 。
- ▶ 右辺 =  $2 \cdot 1 - 1 = 1$ 。
- ▶ したがって、 $n = 1$  のとき  $a_n = 2n - 1$  となる。

## 再帰的定義の例：フィボナッチ数

フィボナッチ数とは？

任意の正の整数  $n$  に対して、第  $n$  番フィボナッチ数  $F_n$  を

$$F_n = \begin{cases} 1 & (n = 1 \text{ のとき}) \\ 1 & (n = 2 \text{ のとき}) \\ F_{n-1} + F_{n-2} & (n > 2 \text{ のとき}) \end{cases}$$

で定義する

確認

- ▶  $n = 1$  のとき:  $F_1 = 1$
- ▶  $n = 2$  のとき:  $F_2 = 1$
- ▶  $n = 3$  のとき:  $F_3 = F_2 + F_1 = 1 + 1 = 2$
- ▶  $n = 4$  のとき:  $F_4 = F_3 + F_2 = 2 + 1 = 3$
- ▶  $n = 5$  のとき:  $F_5 = F_4 + F_3 = 3 + 2 = 5$
- ▶ ...

階乗とは？ (常識に基づく定義)

正の整数  $n$  に対して、 $n$  の階乗とは

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot n$$

のこと

この定義の問題点

- ▶ 「…」はあいまい

あいまいさのないように定義するには？

## 例題 4：再帰的定義

例題 4：証明したいこと

任意の正の整数  $n$  に対して、 $a_n$  を次のように定義する

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

このとき、任意の正の整数  $n$  に対して、

$$a_n = 2n - 1$$

となることを証明せよ

確認

- ▶  $n = 1$  のとき:  $a_1 = 1$
- ▶  $n = 2$  のとき:  $a_2 = a_1 + 2 = 1 + 2 = 3 = 2 \cdot 2 - 1$
- ▶  $n = 3$  のとき:  $a_3 = a_2 + 2 = 3 + 2 = 5 = 2 \cdot 3 - 1$
- ▶ ...

## 例題 4：数学的帰納法による証明 (帰納段階)

例題 4：証明したいこと

任意の正の整数  $n$  に対して、 $a_n$  を次のように定義する

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

このとき、任意の正の整数  $n$  に対して、

$$a_n = 2n - 1$$

となることを証明せよ

証明 (帰納段階)：次に任意の正の整数  $k$  を考える。

- ▶  $a_k = 2k - 1$  であると仮定する。
- ▶ 証明すべきことは、 $a_{k+1} = 2(k+1) - 1$ 。
- ▶  $a_{k+1} = a_k + 2$   
 $= (2k - 1) + 2$  (帰納法の仮定から)  
 $= 2(k+1) - 1$ 。 □

## フィボナッチ数の性質

例題 5 (カッシーニの恒等式)

第  $n$  番フィボナッチ数を  $F_n$  とするとき、任意の正整数  $n$  に対して

$$F_{n+1}^2 - F_{n+2}F_n = (-1)^n$$

が成り立つことを証明せよ

## 例題 5 (カッシーニの恒等式)

第  $n$  番フィボナッチ数を  $F_n$  とするとき、任意の正整数  $n$  に対して

$$F_{n+1}^2 - F_{n+2}F_n = (-1)^n$$

が成り立つことを証明せよ

証明：(基底段階)  $n = 1$  の場合を証明する。

- ▶ 左辺 =  $F_2^2 - F_3F_1 = 1^2 - 2 \cdot 1 = -1$ 。
- ▶ 右辺 =  $(-1)^1 = -1$ 。
- ▶ したがって、 $n = 1$  のとき  $F_{n+1}^2 - F_{n+2}F_n = (-1)^n$  は成り立つ

## 例題 5 (カッシーニの恒等式)

任意の正整数  $n$  に対して第  $n$  番フィボナッチ数を  $F_n$  とするとき

$$F_{n+1}^2 - F_{n+2}F_n = (-1)^n$$

が成り立つことを証明せよ

証明：(帰納段階) 次に、1 以上の任意の正の整数  $k$  を考える。

- ▶  $F_{k+1}^2 - F_{k+2}F_k = (-1)^k$  であると仮定する。
- ▶ 証明すべきことは、 $F_{k+2}^2 - F_{k+3}F_{k+1} = (-1)^{k+1}$  である。
- ▶  $F_{k+2}^2 - F_{k+3}F_{k+1}$ 
  - =  $F_{k+2}^2 - (F_{k+2} + F_{k+1})F_{k+1}$  (フィボナッチ数の定義と  $k+3 > 2$  から)
  - =  $F_{k+2}^2 - F_{k+2}F_{k+1} - F_{k+1}^2$  (展開して整理)
  - =  $F_{k+2}^2 - F_{k+2}F_{k+1} - F_{k+2}F_k - (-1)^k$  (帰納法の仮定から)
  - =  $F_{k+2}(F_{k+2} - F_{k+1} - F_k) + (-1)^{k+1}$  (因数分解して整理)
  - =  $(-1)^{k+1}$  (フィボナッチ数の定義と  $k+2 > 2$  から)

□

## 例題 6：フィボナッチ数の公式

任意の正整数  $n$  に対して第  $n$  番フィボナッチ数を  $F_n$  とするとき

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right)$$

が成り立つことを証明せよ

証明の注意点

- ▶  $F_n$  は  $F_{n-1}, F_{n-2}$  を使って定義される
- ▶ よって、(1 つ前だけ仮定する) 普通の帰納法では証明できない
- ▶ よって、もっと強い証明の仕方が必要となる
- ▶ 基底段階も  $n = 1$  のときと  $n = 2$  のときの 2 つが必要となる

## 数学的帰納法の強いバージョン (累積帰納法とも呼ばれる)

[基底段階]

- ▶  $P(1)$  を証明する

[帰納段階] 任意の正の整数  $k$  を考える

- ▶ 1 以上  $k$  以下の任意の正の整数  $k'$  に対して  $P(k')$  を仮定する
- ▶  $P(k+1)$  を証明する

- ▶ 前のバージョンでは帰納段階で「 $P(k)$ 」のみを仮定した
- ▶ フィボナッチ数に関する証明では基底段階が  $P(1)$  と  $P(2)$  になる

## 例題 6：フィボナッチ数の公式

任意の正整数  $n$  に対して第  $n$  番フィボナッチ数を  $F_n$  とするとき

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right)$$

が成り立つことを証明せよ

証明：まず、 $n = 1$  のときを証明する。

- ▶ 左辺 =  $F_1 = 1$ 。
- ▶ 右辺 =  $\frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^1 - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^1 \right) = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot \sqrt{5} = 1$ 。
- ▶ したがって、 $n = 1$  のときは正しい。

## 例題 6：フィボナッチ数の公式

任意の正整数  $n$  に対して第  $n$  番フィボナッチ数を  $F_n$  とするとき

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right)$$

が成り立つことを証明せよ

証明：次に、 $n = 2$  のときを証明する。

- ▶ 左辺 =  $F_2 = 1$ 。
- ▶ 右辺 =  $\frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^2 - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^2 \right) = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot \left( \frac{6+2\sqrt{5}}{4} - \frac{6-2\sqrt{5}}{4} \right) = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot \sqrt{5} = 1$ 。
- ▶ したがって、 $n = 2$  のときは正しい。

## 例題 6：フィボナッチ数の公式

任意の正整数  $n$  に対して第  $n$  番フィボナッチ数を  $F_n$  とするとき

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right)$$

が成り立つことを証明せよ

証明： $k$  を 2 以上の任意の整数とする。

- ▶ 1 以上  $k$  以下の任意の整数  $k'$  に対して、 $F_{k'} = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{k'} - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{k'} \right)$  と仮定する。
- ▶ 証明すべきことは、 $F_{k+1} = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{k+1} - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{k+1} \right)$  である。

$$\begin{aligned} F_{k+1} &= F_k + F_{k-1} && \text{(フィボナッチ数の定義と } k+1 > 2 \text{)} \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^k - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^k \right) + \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{k-1} - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{k-1} \right) && \text{(帰納法の仮定)} \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{k-1} \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} + 1 \right) - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{k-1} \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} + 1 \right) \right) && \text{(式の整理)} \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{k-1} \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^2 - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{k-1} \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^2 \right) && \text{(式の整理)} \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{k+1} - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{k+1} \right) && \text{(式の整理)} \end{aligned}$$

したがって、 $F_{k+1} = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{k+1} - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{k+1} \right)$  となる。 □

どうしてこのような数学的帰納法になるのか？

### 疑問

どうして

- ▶ 累積帰納法を使うのか？
- ▶  $n = 1, 2$  の場合を基底段階にしないといけないのか？

証明を行う際の下書きを考えれば分かる

### 格言

数学的帰納法で証明するとき、下書きは帰納段階から始める

フィボナッチ数の公式：証明の下書き (1)

### 帰納段階で証明する目標

$$F_{k+1} = \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{k+1} - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{k+1} \right)$$

$$\begin{aligned} F_{k+1} &= F_k + F_{k-1} && (\text{フィボナッチ数の定義と } k+1 > 2) \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^k - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^k \right) + \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{k-1} - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{k-1} \right) \\ &= \dots && (\text{帰納法の仮定}) \end{aligned}$$

つまり、 $n = k+1$  の場合を考えると、次の2つを仮定しないとイケない

- ▶  $n = k$  の場合
- ▶  $n = k-1$  の場合

ここから、普通の数学的帰納法では足りないことが分かる

フィボナッチ数の公式：証明の下書き (2)

$$\begin{aligned} F_{k+1} &= F_k + F_{k-1} && (\text{フィボナッチ数の定義と } k+1 > 2) \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^k - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^k \right) + \frac{1}{\sqrt{5}} \left( \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{k-1} - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{k-1} \right) \\ &= \dots && (\text{帰納法の仮定}) \end{aligned}$$

仮に、 $n = k+1 = 2$  の場合を考えると、次の2つを仮定することになる

- ▶  $n = k = 1$  の場合
- ▶  $n = k-1 = 0$  の場合

しかし、 $n = 0$  の場合は考えないので、 $k+1 = 2$  にはできない

- ▶ つまり、帰納段階は  $k+1 \geq 3$  の場合であり、
- ▶  $k+1 = 2$  のときは基底段階にしないとイケない

### 下書きから分かった行うべき数学的帰納法

- ▶ 基底段階： $n = 1, 2$  の場合
- ▶ 帰納段階： $k \geq 2$  として、累積帰納法

### 目次

- ① 数学的帰納法
- ② 再帰的定義
- ③ 今日のまとめ

### 今日のまとめ

#### この講義の目標

- ▶ 語学としての数学、コミュニケーションとしての数学

#### 今日の目標

- ▶ 数学的帰納法で証明ができるようになる
- ▶ 再帰的定義によって無限を扱う方法を理解する

### 残った時間の使い方

- ▶ 演習問題をやる
  - ▶ 相談推奨 (ひとりではやらない)
- ▶ 質問をする
  - ▶ 教員とティーチング・アシスタントは巡回
- ▶ 退室時、小さな紙に感想など書いて提出する ←重要
  - ▶ 内容は何でも OK
  - ▶ 匿名で OK
- ▶ 「学生による授業評価」マークシート
  - ▶ 科目番号：1464, 科目名：離散数学, 教員名：岡本 吉央