q-類似の Coq による形式化

アドバイザー： Jacques Garrigue 教授
学籍番号： 322101289
氏名： 中村　薫

February 2, 2023

はじめに

目的：q-類似の初等的な結果を Coq を用いて形式化する

はじめに

目的：q-類似の初等的な結果を Coq を用いて形式化する

q-類似　$q \to 1$ で通常の数学に戻るような諸概念の拡張

はじめに

目的：q-類似の初等的な結果を Coq を用いて形式化する

q-類似 $q \to 1$ で通常の数学に戻るような諸概念の拡張

形式化 人工言語に数学的な主張とその証明を翻訳し, 正しさを機械的に検証すること

はじめに

目的：q-類似の初等的な結果を Coq を用いて形式化する

- **q-類似** $q \to 1$ で通常の数学に戻るような諸概念の拡張
- **形式化** 人工言語に数学的な主張とその証明を翻訳し，正しさを機械的に検証すること
- **Coq** 形式化を行うためのソフトウェア

はじめに

目的：q-類似の初等的な結果を Coq を用いて形式化する

- q-類似　$q \to 1$ で通常の数学に戻るような諸概念の拡張
- 形式化　人工言語に数学的な主張とその証明を翻訳し，正しさを機械的に検証すること
- Coq　形式化を行うためのソフトウェア

形式化の意義：

はじめに

目的：q-類似の初等的な結果を Coq を用いて形式化する

- **q-類似** $q \to 1$ で通常の数学に戻るような諸概念の拡張
- **形式化** 人工言語に数学的な主張とその証明を翻訳し, 正しさを機械的に検証すること
- **Coq** 形式化を行うためのソフトウェア

形式化の意義：

- 人間がチェックすることが難しい複雑な証明の正しさの保証

はじめに

目的：q-類似の初等的な結果を Coq を用いて形式化する

- **q-類似** $q \to 1$ で通常の数学に戻るような諸概念の拡張
- **形式化** 人工言語に数学的な主張とその証明を翻訳し, 正しさを機械的に検証すること
- **Coq** 形式化を行うためのソフトウェア

形式化の意義：

- 人間がチェックすることが難しい複雑な証明の正しさの保証
- 証明付きプログラミング

はじめに

目的：q-類似の初等的な結果を Coq を用いて形式化する

- **q-類似** $q \to 1$ で通常の数学に戻るような諸概念の拡張
- **形式化** 人工言語に数学的な主張とその証明を翻訳し, 正しさを機械的に検証すること
- **Coq** 形式化を行うためのソフトウェア

形式化の意義：

- 人間がチェックすることが難しい複雑な証明の正しさの保証
- 証明付きプログラミング

本発表における q-類似の定義, 定理及びその証明は Victor Kac, Pokman Cheung の *Quantum Calculus* [2] によるものだが, その形式化を行ったという点において独自性がある. 形式化したコード全体は `https://github.com/nakamurakaoru/q-analogue/tree/thesis` [5] にある (q_analogu.v 1556 行, q_tool.v 331 行).

q-類似の概要

q-類似：以下の 2 つの条件をみたす数学の諸概念の一般化

q-類似の概要

q-類似：以下の 2 つの条件をみたす数学の諸概念の一般化

- $q \to 1$ とすると通常の数学に一致する

q-類似の概要

q-類似：以下の 2 つの条件をみたす数学の諸概念の一般化

- $q \to 1$ とすると通常の数学に一致する
- 実数パラメータ q, 実数上の関数 f に対して

$$D_q f(x) := \frac{f(qx) - f(x)}{(q-1)x}$$

で定義される q-微分に対してうまく振る舞う

q-類似の概要

q-類似：以下の 2 つの条件をみたす数学の諸概念の一般化

- $q \to 1$ とすると通常の数学に一致する
- 実数パラメータ q, 実数上の関数 f に対して

$$D_q f(x) := \frac{f(qx) - f(x)}{(q-1)x}$$

  で定義される q-微分に対してうまく振る舞う

q-類似を考える利点：あえてパラメータを増やすことで証明が簡単になる場合がある

q-類似の概要

q-類似：以下の 2 つの条件をみたす数学の諸概念の一般化

- $q \to 1$ とすると通常の数学に一致する
- 実数パラメータ q, 実数上の関数 f に対して

$$D_q f(x) := \frac{f(qx) - f(x)}{(q-1)x}$$

で定義される q-微分に対してうまく振る舞う

q-類似を考える利点：あえてパラメータを増やすことで証明が簡単になる場合がある

Jacobi の三重積 ([2] p35 Theorem 11.1)

$z, q \in \mathbb{R}$, $|q| < 1$ として,

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} q^{n^2} z^n = \prod_{n=1}^{\infty} (1 - q^{2n})(1 + q^{2n-1} z)(1 + q^{2n-1} z^{-1})$$

が成り立つ.

本節の目標

q-Taylor 展開

$f(x)$ を, N 次の実数係数多項式とする. 任意の $c \in \mathbb{R}$ に対し,

$$f(x) = \sum_{j=0}^{N} (D_q^j f)(c) \frac{(x-c)_q^j}{[j]!}$$

が成り立つ.

本節の目標

q-Taylor 展開

$f(x)$ を, N 次の実数係数多項式とする. 任意の $c \in \mathbb{R}$ に対し,

$$f(x) = \sum_{j=0}^{N} (D_q^j f)(c) \frac{(x-c)_q^j}{[j]!}$$

が成り立つ.

1. D_q の定義

本節の目標

q-Taylor 展開

$f(x)$ を, N 次の実数係数多項式とする. 任意の $c \in \mathbb{R}$ に対し,

$$f(x) = \sum_{j=0}^{N} (D_q^j f)(c) \frac{(x-c)_q^j}{[j]!}$$

が成り立つ.

1. D_q の定義
2. $[n]$ の定義

本節の目標

q-Taylor 展開

$f(x)$ を, N 次の実数係数多項式とする. 任意の $c \in \mathbb{R}$ に対し,

$$f(x) = \sum_{j=0}^{N} (D_q^j f)(c) \frac{(x-c)_q^j}{[j]!}$$

が成り立つ.

1. D_q の定義
2. $[n]$ の定義
3. $(x-c)_q^n$ の定義

q-微分

q-差分, q-微分の定義をする. 以下, q を 1 でない実数とする.

q-微分

q-差分, q-微分の定義をする. 以下, q を 1 でない実数とする.

Definition 2.1 ([2] p1 (1.1), p2 (1.5))

関数 $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ に対して, $f(x)$ の q 差分 $d_q f(x)$ を,

$$d_q f(x) := f(qx) - f(x)$$

と定める. 更に, $f(x)$ の q 微分 $D_q f(x)$ を,

$$D_q f(x) := \frac{d_q f(x)}{d_q x} = \frac{f(qx) - f(x)}{(q-1)x}$$

と定める.

自然数の q-類似

$f(x) = x^n$ $(n \in \mathbb{N})$ を定義に沿って q-微分する.

自然数の q-類似

$f(x) = x^n$ $(n \in \mathbb{N})$ を定義に沿って q-微分する.

$$D_q f(x) := \frac{d_q f(x)}{d_q x} = \frac{f(qx) - f(x)}{(q-1)x}$$

自然数の q-類似

$f(x) = x^n$ ($n \in \mathbb{N}$) を定義に沿って q-微分する.

$$D_q f(x) := \frac{d_q f(x)}{d_q x} = \frac{f(qx) - f(x)}{(q-1)x}$$

$$D_q x^n = \frac{(qx)^n - x^n}{(q-1)x}$$

$f(x) = x^n$ $(n \in \mathbb{N})$ を定義に沿って q-微分する.

$$D_q f(x) := \frac{d_q f(x)}{d_q x} = \frac{f(qx) - f(x)}{(q-1)x}$$

$$D_q x^n = \frac{(qx)^n - x^n}{(q-1)x} = \frac{q^n - 1}{q - 1} x^{n-1}$$

自然数の q-類似

$f(x) = x^n$ $(n \in \mathbb{N})$ を定義に沿って q-微分する.

$$D_q f(x) := \frac{d_q f(x)}{d_q x} = \frac{f(qx) - f(x)}{(q-1)x}$$

$$D_q x^n = \frac{(qx)^n - x^n}{(q-1)x} = \frac{q^n - 1}{q - 1} x^{n-1}$$

通常の微分では, $(x^n)' = nx^{n-1}$ となることと比較して, n の q-類似 $[n]$ を次のように定める ([2] p2 (1.9)).

自然数の q-類似

$f(x) = x^n$ $(n \in \mathbb{N})$ を定義に沿って q-微分する.

$$D_q f(x) := \frac{d_q f(x)}{d_q x} = \frac{f(qx) - f(x)}{(q-1)x}$$

$$D_q x^n = \frac{(qx)^n - x^n}{(q-1)x} = \frac{q^n - 1}{q-1} x^{n-1}$$

通常の微分では, $(x^n)' = nx^{n-1}$ となることと比較して, n の q-類似 $[n]$ を次のように定める ([2] p2 (1.9)).

$$[n] = \frac{q^n - 1}{q - 1}$$

自然数の q-類似

$f(x) = x^n$ $(n \in \mathbb{N})$ を定義に沿って q-微分する.

$$D_q f(x) := \frac{d_q f(x)}{d_q x} = \frac{f(qx) - f(x)}{(q-1)x}$$

$$D_q x^n = \frac{(qx)^n - x^n}{(q-1)x} = \frac{q^n - 1}{q-1} x^{n-1}$$

通常の微分では, $(x^n)' = nx^{n-1}$ となることと比較して, n の q-類似 $[n]$ を次のように定める ([2] p2 (1.9)).

$$[n] = \frac{q^n - 1}{q-1} (= 1 + q + q^2 + \cdots q^{n-1})$$

$(x-a)^n$ の q-類似

Definition 2.2 ([2] p8 Definition (3.4))

$x, a \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{N}$ に対して, $(x-a)^n$ の q-類似 $(x-a)_q^n$ を,

$$(x-a)_q^n = \begin{cases} 1 & \text{if } n = 0 \\ (x-a)(x-qa)\cdots(x-q^{n-1}a) & \text{if } n \geq 1 \end{cases}$$

と定義する.

$(x-a)^n$ の q-類似

Definition 2.2 ([2] p8 Definition (3.4))

$x, a \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{N}$ に対して, $(x-a)^n$ の q-類似 $(x-a)_q^n$ を,

$$(x-a)_q^n = \begin{cases} 1 & \text{if } n = 0 \\ (x-a)(x-qa)\cdots(x-q^{n-1}a) & \text{if } n \geq 1 \end{cases}$$

と定義する.

Proposition 2.3

$n \in \mathbb{Z}_{>0}$ に対し,

$$D_q(x-a)_q^n = [n](x-a)_q^{n-1}$$

が成り立つ.

Definition 2.4 ([2] p7 (3.1))

$n \in \mathbb{N}$ について, 階乗の q-類似を以下のように定める.

$$[n]! := \begin{cases} 1 & (n = 0) \\ [n] \times [n-1] \times \cdots \times [1] & (n \geq 1) \end{cases}$$

q-Taylor 展開

Definition 2.4 ([2] p7 (3.1))

$n \in \mathbb{N}$ について, 階乗の q-類似を以下のように定める.

$$[n]! := \begin{cases} 1 & (n = 0) \\ [n] \times [n-1] \times \cdots \times [1] & (n \geq 1) \end{cases}$$

Theorem 2.5 ([2] p12 Theorem 4.1)

$f(x)$ を, N 次の実数係数多項式とする. 任意の $c \in \mathbb{R}$ に対し,

$$f(x) = \sum_{j=0}^{N} (D_q^j f)(c) \frac{(x-c)_q^j}{[j]!}$$

が成り立つ.

Gauss's binomial formula

Lemma 2.6 ([2] p15 Example (5.5))

$n \in \mathbb{Z}_{>0}$ について,

$$(x+a)_q^n = \sum_{j=0}^{n} \begin{bmatrix} n \\ j \end{bmatrix} q^{j(j-1)/2} a^j x^{n-j}$$

が成り立つ. この式は Gauss's binomial formula と呼ばれる.

Gauss's binomial formula

Lemma 2.6 ([2] p15 Example (5.5))

$n \in \mathbb{Z}_{>0}$ について,

$$(x+a)_q^n = \sum_{j=0}^{n} \begin{bmatrix} n \\ j \end{bmatrix} q^{j(j-1)/2} a^j x^{n-j}$$

が成り立つ. この式は Gauss's binomial formula と呼ばれる.

Definition 2.7 ([2] p12 (4.5))

$n \geq j$ をみたす $n, j \in \mathbb{N}$ について, 二項係数の q-類似を以下のように定める.

$$\begin{bmatrix} n \\ j \end{bmatrix} := \frac{[n]!}{[j]![n-j]!}$$

Coq の使い方 コマンド

Coq に与える命令はコマンドとタクティックの 2 種類がある.

Coq の使い方 コマンド

Coq に与える命令はコマンドとタクティックの 2 種類がある.

`Require Import` ライブラリを読み込む.

- `Variable` 特定の型を持つ変数を宣言する

`Definition` 新たに関数を定義する.

- `Fixpoint` 再帰関数を定義する. 停止性が保証されていない関数を定義することはできない.
- `Lemma` 補題を宣言する. `Lemma` の代わりに `Theorem`, `Corollary` 等でも同じ機能をもつ.

`Proof/Qed` `Proof` は `Lemma` の後に書いて補題の主張と証明を分ける. 証明を完了させて `Qed` を書くことで Coq に補題を登録することができ, 他の補題の証明に使えるようになる.

Coq の使い方 コマンド

Coq に与える命令はコマンドとタクティックの 2 種類がある.

`Require Import` ライブラリを読み込む.

`Variable` 特定の型を持つ変数を宣言する

`Definition` 新たに関数を定義する.

`Fixpoint` 再帰関数を定義する. 停止性が保証されていない関数を定義することはできない.

`Lemma` 補題を宣言する. `Lemma` の代わりに `Theorem`, `Corollary` 等でも同じ機能をもつ.

`Proof/Qed` `Proof` は `Lemma` の後に書いて補題の主張と証明を分ける. 証明を完了させて `Qed` を書くことで Coq に補題を登録することができ, 他の補題の証明に使えるようになる.

タクティックは `Proof...Qed` の間に使われる. よく使われるタクティックは `move`, `apply`, `rewrite` の 3 つ.

Coq の使い方 代入計算

自然数 m, n について

$$m = 0 \Longrightarrow n + m = n$$

Coq の使い方 代入計算

自然数 m, n について

$$m = 0 \Longrightarrow n + m = n$$

```
Lemma substitution m n : m = 0 → n + m = n.
```

Coq の使い方 代入計算

```
1 subgoal
m, n : nat
--------------------------------
m = 0 → n + m = n
```

Coq の使い方 代入計算

```
1 subgoal
m, n : nat
-------------------------------
m = 0 → n + m = n
```

タクティック：`move=> Hm`

Coq の使い方 代入計算

```
1 subgoal
m, n : nat
Hm : m = 0
______________________________
n + m = 0
```

Coq の使い方 代入計算

```
1 subgoal
m, n : nat
Hm : m = 0
-------------------------------
n + m = 0
```

タクティック：`rewrite Hm`

Coq の使い方 代入計算

```
1 subgoal
m, n : nat
Hm : m = 0
-------------------------------
n + 0 = n
```

Coq の使い方 代入計算

```
1 subgoal
m, n : nat
Hm : m = 0
-------------------------------
n + 0 = n
```

タクティック：`rewrite addn0`

Coq の使い方 代入計算

```
1 subgoal
m, n : nat
Hm : m = 0
--------------------------------
n = n
```

Coq の使い方 代入計算

```
1 subgoal
m, n : nat
Hm : m = 0
-------------------------------
n = n
```

タクティック：done

Coq の使い方 代入計算

```
No more subgoals.
```

Coqの使い方 代入計算

```
No more subgoals.
```

コマンド：`Qed`

Coq の使い方 代入計算

```
Lemma substitution m n : m = 0 → n + m = n.
Proof.
  move⇒ Hm.
  rewrite Hm.
  rewrite addn0.
  by [].
Qed.
```

本節の目標

本節の目標

```
Theorem q_Taylorp n (f : {poly R}) c :
  (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  size f = n.+1 →
  f = \sum_(0 ≤ i < n.+1)
    ((Dqp' \^ i) f).[c] *: (qbinom_pos_poly c i / (qfact i)%:P).

Theorem Gauss_binomial a n : (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  qbinom_pos_poly (-a) n =
    \sum_(0 ≤ i < n.+1)
      (qbicoef n i * q ^+ (i * (i - 1))./2 * a ^+ i) *: 'X^(n - i).
```

本節の目標

```
Theorem q_Taylorp n (f : {poly R}) c :
  (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  size f = n.+1 →
  f = \sum_(0 ≤ i < n.+1)
    ((Dqp' \^ i) f).[c] *: (qbinom_pos_poly c i / (qfact i)%:P).

Theorem Gauss_binomial a n : (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  qbinom_pos_poly (-a) n =
    \sum_(0 ≤ i < n.+1)
      (qbicoef n i * q ^+ (i * (i - 1))./2 * a ^+ i) *: 'X^(n - i).
```

- q-微分の形式化

本節の目標

```
Theorem q_Taylorp n (f : {poly R}) c :
  (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  size f = n.+1 →
  f = \sum_(0 ≤ i < n.+1)
    ((Dqp' \^ i) f).[c] *: (qbinom_pos_poly c i / (qfact i)%:P).

Theorem Gauss_binomial a n : (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  qbinom_pos_poly (-a) n =
    \sum_(0 ≤ i < n.+1)
      (qbicoef n i * q ^+ (i * (i - 1))./2 * a ^+ i) *: 'X^(n - i).
```

- q-微分の形式化
- $[n]$ の形式化

本節の目標

```
Theorem q_Taylorp n (f : {poly R}) c :
  (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  size f = n.+1 →
  f = \sum_(0 ≤ i < n.+1)
    ((Dqp' \^ i) f).[c] *: (qbinom_pos_poly c i / (qfact i)%:P).

Theorem Gauss_binomial a n : (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  qbinom_pos_poly (-a) n =
    \sum_(0 ≤ i < n.+1)
      (qbicoef n i * q ^+ (i * (i - 1))./2 * a ^+ i) *: 'X^(n - i).
```

- q-微分の形式化
- $[n]$ の形式化
- $(x-a)_q^n$ の形式化

本節の目標

```
Theorem q_Taylorp n (f : {poly R}) c :
  (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  size f = n.+1 →
  f = \sum_(0 ≤ i < n.+1)
    ((Dqp' \^ i) f).[c] *: (qbinom_pos_poly c i / (qfact i)%:P).

Theorem Gauss_binomial a n : (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  qbinom_pos_poly (-a) n =
    \sum_(0 ≤ i < n.+1)
      (qbicoef n i * q ^+ (i * (i - 1))./2 * a ^+ i) *: 'X^(n - i).
```

- q-微分の形式化
- $[n]$ の形式化
- $(x-a)_q^n$ の形式化
- 関数から多項式へ

q-微分の形式化

$$d_q f(x) := f(qx) - f(x) \quad D_q f(x) := \frac{d_q f(x)}{d_q x}$$

q-微分の形式化

$$d_q f(x) := f(qx) - f(x) \quad D_q f(x) := \frac{d_q f(x)}{d_q x}$$

```
Variables (R : rcfType) (q : R).
Hypothesis Hq : q - 1 ≠ 0.

Notation "f // g" := (fun x ⇒ f x / g x) (at level 40).

Definition dq (f : R → R) x := f (q * x) - f x.
Definition Dq f := dq f // dq id.
```

$[n]$ の形式化

$$[n] := \frac{q^n - 1}{q - 1} \quad D_q x^n = \frac{(qx)^n - x^n}{(q-1)x} = \frac{q^n - 1}{q - 1} \cdot \frac{x^n}{x} = [n]x^{n-1}$$

$[n]$ の形式化

$$[n] := \frac{q^n - 1}{q - 1} \quad D_q x^n = \frac{(qx)^n - x^n}{(q-1)x} = \frac{q^n - 1}{q - 1} \cdot \frac{x^n}{x} = [n]x^{n-1}$$

```
Definition qnat n : R := (q ^ n - 1) / (q - 1).

Lemma Dq_pow n x : x ≠ 0 →
  Dq (fun x ⇒ x ^ n) x = qnat n * x ^ (n - 1).
Proof.
  move⇒ Hx.
  rewrite /Dq /dq /qnat.
  rewrite -{4}(mul1r x) -mulrBl expfzMl -add_div;
    last by apply mulf_neq0.
  rewrite [in x ^ n](_ : n = (n -1) +1) //; last by rewrite subrK.
  rewrite expfzDr ?expr1z ?mulrA -?mulNr ?red_frac_r ?add_div //.
  rewrite -{2}[x ^ (n - 1)]mul1r -mulrBl mulrC mulrA.
  by rewrite [in (q - 1)^-1 * (q ^ n - 1)] mulrC.
Qed.
```

$(x-a)_q^n$ の形式化

$$(x-a)_q^n := \begin{cases} 1 & \text{if } n = 0 \\ (x-a)(x-qa)\cdots(x-q^{n-1}a) & \text{if } n \geq 1 \end{cases}$$

$$D_q(x-a)_q^n = [n](x-a)_q^{n-1} \quad (n \in \mathbb{Z}_{>0})$$

$(x-a)_q^n$ の形式化

$$(x-a)_q^n := \begin{cases} 1 & \text{if } n = 0 \\ (x-a)(x-qa)\cdots(x-q^{n-1}a) & \text{if } n \geq 1 \end{cases}$$

$$D_q(x-a)_q^n = [n](x-a)_q^{n-1} \quad (n \in \mathbb{Z}_{>0})$$

```
Fixpoint qbinom_pos a n x :=
  match n with
  | 0 ⇒ 1
  | n0.+1 ⇒ (qbinom_pos a n0 x) * (x - q ^ n0 * a)
  end.

Theorem Dq_qbinom_pos a n x : x ≠ 0 →
  Dq (qbinom_pos a n.+1) x = qnat n.+1 * qbinom_pos a n x.
```

関数から多項式へ

関数から多項式へ

約分に条件が必要ない

関数から多項式へ

約分に条件が必要ない

$x/x = 1$ を計算するとき

- 実数 $\cdots$ $x \neq 0$ が必要

関数から多項式へ

約分に条件が必要ない

$x/x = 1$ を計算するとき

- 実数 $\cdots$ $x \neq 0$ が必要
- 多項式 $\cdots$ x は単項式なので自動的に $x \neq 0$(ゼロ多項式)

関数から多項式へ

約分に条件が必要ない

$x/x = 1$ を計算するとき

- 実数 $\cdots$ $x \neq 0$ が必要
- 多項式 $\cdots$ x は単項式なので自動的に $x \neq 0$(ゼロ多項式)

$\to$ 多項式で考えれば約分した後でも $x = 0$ での値が求められる.

関数から多項式へ

約分に条件が必要ない
$x/x = 1$ を計算するとき

- 実数 $\cdots$ $x \neq 0$ が必要
- 多項式 $\cdots$ x は単項式なので自動的に $x \neq 0$(ゼロ多項式)

$\rightarrow$ 多項式で考えれば約分した後でも $x = 0$ での値が求められる.

$$D_q(x-a)_q^n = [n](x-a)_q^{n-1}$$

という計算をした後でも 0 での値が求められる.

関数から多項式へ

約分に条件が必要ない
$x/x = 1$ を計算するとき

- 実数 $\cdots$ $x \neq 0$ が必要
- 多項式 $\cdots$ x は単項式なので自動的に $x \neq 0$(ゼロ多項式)

$\to$ 多項式で考えれば約分した後でも $x = 0$ での値が求められる.

$$D_q(x-a)_q^n = [n](x-a)_q^{n-1}$$

という計算をした後でも 0 での値が求められる.
→Gauss's binomial formula の証明に必要

多項式での再定義

q-差分

```
Definition scale_var (p : {poly R}):=
 \poly_(i < size p) (q ^ i * p`_i).
Definition dqp p := scale_var p - p.
```

多項式での再定義

q-差分

```
Definition scale_var (p : {poly R}):=
 \poly_(i < size p) (q ^ i * p`_i).
Definition dqp p := scale_var p - p.
```

scale_var $\cdots$ $p \mapsto$ (p の i 次の係数を q^i 倍した多項式)

多項式での再定義

q-差分

```
Definition scale_var (p : {poly R}):=
 \poly_(i < size p) (q ^ i * p`_i).
Definition dqp p := scale_var p - p.
```

scale_var $\cdots$ $p \mapsto$ (p の i 次の係数を q^i 倍した多項式)

q-微分

```
Definition Dqp p := dqp p %/ dqp 'X.
Definition Dqp' (p : {poly R}) :=
  \poly_(i < size p) (qnat (i.+1) * p`_i.+1).
```

多項式での再定義

q-差分

```
Definition scale_var (p : {poly R}):=
 \poly_(i < size p) (q ^ i * p`_i).
Definition dqp p := scale_var p - p.
```

`scale_var` $\cdots$ $p \mapsto$ (p の i 次の係数を q^i 倍した多項式)

q-微分

```
Definition Dqp p := dqp p %/ dqp 'X.
Definition Dqp' (p : {poly R}) :=
  \poly_(i < size p) (qnat (i.+1) * p`_i.+1).
```

$(x - a)_q^n$

```
Fixpoint qbinom_pos_poly a n :=
  match n with
  | 0 => 1
  | n0.+1 => (qbinom_pos_poly a n0) * ('X - (q ^ n0 * a)%:P)
  end.
```

q-Taylor 展開の形式化

$$f(x) = \sum_{j=0}^{N} (D_q^j f)(c) \frac{(x-c)_q^j}{[j]!}$$

q-Taylor 展開の形式化

$$f(x) = \sum_{j=0}^{N} (D_q^j f)(c) \frac{(x-c)_q^j}{[j]!}$$

```
Fixpoint qfact n :=
  match n with
  | 0 ⇒ 1
  | n0.+1 ⇒ qfact n0 * qnat n0.+1
  end.

Theorem q_Taylorp n (f : {poly R}) c :
  (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  size f = n.+1 →
  f = \sum_(0 ≤ i < n.+1)
    ((Dqp' \^ i) f).[c] *: (qbinom_pos_poly c i / (qfact i)%:P).
```

Gauss's binomial formula の形式化

$$(x+a)_q^n = \sum_{j=0}^{n} \left[\begin{array}{c} n \\ j \end{array} \right] q^{j(j-1)/2} a^j x^{n-j}$$

Gauss's binomial formula の形式化

$$(x+a)_q^n = \sum_{j=0}^{n} \begin{bmatrix} n \\ j \end{bmatrix} q^{j(j-1)/2} a^j x^{n-j}$$

```
Definition qbicoef n j := qfact n / (qfact j * qfact (n - j)).

Theorem Gauss_binomial a n : (∀ n, qfact n ≠ 0) →
  qbinom_pos_poly (-a) n =
    \sum_(0 ≤ i < n.+1)
      (qbicoef n i * q ^+ (i * (i - 1))./2 * a ^+ i) *: 'X^(n - i).
```

今後の展望

現在開発中のライブラリ mathcomp analysis [4] の利用

今後の展望

現在開発中のライブラリ mathcomp analysis [4] の利用

- $q \to 1$ で通常の数学に戻ることの形式化

今後の展望

現在開発中のライブラリ mathcomp analysis [4] の利用

- $q \to 1$ で通常の数学に戻ることの形式化
- 無限和に関する形式化

今後の展望

現在開発中のライブラリ mathcomp analysis [4] の利用

- $q \to 1$ で通常の数学に戻ることの形式化
- 無限和に関する形式化
  →Gauss's binomial formula の拡張, q-指数関数, q-三角関数

Appendix q-微分の諸性質

線形性 ([2] p2)

$$D_q(af(x)+bg(x)) = aD_qf(x)+bD_qg(x)$$

積の微分法則 ([2] p3 (1.11), (1.12))

$$D_q(f(x)g(x)) = f(qx)D_qg(x)+g(x)D_qf(x)$$
$$D_q(f(x)g(x)) = f(x)D_qg(x)+g(qx)D_qf(x)$$

商の微分法則 ([2] p3 (1.13), (1.14))

$$D_q\left(\frac{f(x)}{g(x)}\right) = \frac{g(x)D_qf(x)-f(x)D_qg(x)}{g(x)g(qx)}$$
$$D_q\left(\frac{f(x)}{g(x)}\right) = \frac{g(qx)D_qf(x)-f(qx)D_qg(x)}{g(x)g(qx)}$$

Appendix $(x-a)_q^n$ の指数法則と負冪

Proposition 6.1 ([2] p8 (3.6))

$x, a \in \mathbb{R}, m, n \in \mathbb{Z}_{>0}$ について,

$$(x-a)_q^{m+n} = (x-a)_q^m (x-q^m a)_q^n$$

が成り立つ.

Definition 6.2 ([2] p9 (3.7))

$x,\ a \in \mathbb{R},\ l \in \mathbb{Z}_{>0}$ とする. このとき,

$$(x-a)_q^{-l} := \frac{1}{(x-q^{-l}a)_q^l}$$

と定める.

Appendix モーダスポーネンス

「命題 P, Q について, $P \Longrightarrow Q$ かつ P であれば, Q が成り立つ」

「命題 P, Q について, $P \Longrightarrow Q$ かつ P であれば, Q が成り立つ」

```
From mathcomp Require Import ssreflect.

Lemma modus_ponens (P Q : Prop) : (P → Q) ∧ P → Q.
```

Appendix モーダスポーネンス

「命題 P, Q について, $P \Longrightarrow Q$ かつ P であれば, Q が成り立つ」

```
From mathcomp Require Import ssreflect.

Lemma modus_ponens (P Q : Prop) : (P → Q) ∧ P → Q.
```

`Prop` は Coq での命題全体を表す型, $\wedge$ は「かつ」を表す

Appendix モーダスポーネンス

```
1 subgoal
P, Q : Prop
-------------------------------
(P → Q) ∧ P → Q
```

Appendix モーダスポーネンス

```
1 subgoal
P, Q : Prop
--------------------------------
(P → Q) ∧ P → Q
```

タクティック：`move=> []`

Appendix モーダスポーネンス

```
1 subgoal
P, Q : Prop
--------------------------------
(P → Q) → P → Q
```

Appendix モーダスポーネンス

```
1 subgoal
P, Q : Prop
--------------------------------
(P → Q) → P → Q
```

タクティック：`move=> pq`

Appendix モーダスポーネンス

```
1 subgoal
P, Q : Prop
pq : P → Q
--------------------------------
P → Q
```

Appendix モーダスポーネンス

```
1 subgoal
P, Q : Prop
pq : P → Q
-------------------------------
P → Q
```

タクティック：`move=> p`

Appendix モーダスポーネンス

```
1 subgoal
P, Q : Prop
pq : P → Q
p : P
________________________________
Q
```

Appendix モーダスポーネンス

```
1 subgoal
P, Q : Prop
pq : P → Q
p : P
_______________________________
Q
```

タクティック：`apply pq`

Appendix モーダスポーネンス

```
1 subgoal
P, Q : Prop
pq : P → Q
p : P
-------------------------------
P
```

Appendix モーダスポーネンス

```
1 subgoal
P, Q : Prop
pq : P → Q
p : P
-------------------------------
P
```

タクティック：done

Appendix モーダスポーネンス

```
No more subgoals.
```

Appendix モーダスポーネンス

```
No more subgoals.
```

コマンド：`Qed`

Appendix モーダスポーネンス

```
Lemma modus_ponens (P Q : Prop) : (P → Q) ∧ P → Q.
Proof.
  move⇒ [].
  move⇒ pq.
  move⇒ p.
  apply pq.
  done.
Qed.
```

Appendix mathcomp の構造

標準ライブラリ [1] に加えて mathcomp [3] を用いる.

Appendix mathcomp の構造

標準ライブラリ [1] に加えて mathcomp [3] を用いる.
mathcomp の型には階層構造があり, より一般の型の性質を引き継ぐ.

Appendix mathcomp の構造

標準ライブラリ [1] に加えて mathcomp [3] を用いる.
mathcomp の型には階層構造があり, より一般の型の性質を引き継ぐ.
今回は実数として `rcfType`(Real Closed Field：実閉体) を使う.

Appendix mathcomp の構造

標準ライブラリ [1] に加えて mathcomp [3] を用いる.
mathcomp の型には階層構造があり, より一般の型の性質を引き継ぐ.
今回は実数として `rcfType`(Real Closed Field：実閉体) を使う.

`eqType` $\rightarrow$ `choiceType`
$\rightarrow$ `zmodType` $\rightarrow$ `ringType` $\rightarrow$ `comRingType` $\rightarrow$ `comUnitRingType`
$\rightarrow$ `idomainType` $\rightarrow$ `fieldType`
$\rightarrow$ `numFieldType` $\rightarrow$ `realFieldType` $\rightarrow$ `rcfType`

Appendix mathcomp の構造

標準ライブラリ [1] に加えて mathcomp [3] を用いる.
mathcomp の型には階層構造があり, より一般の型の性質を引き継ぐ.
今回は実数として `rcfType`(Real Closed Field：実閉体) を使う.

`eqType` → `choiceType`
→ `zmodType` → `ringType` → `comRingType` → `comUnitRingType`
→ `idomainType` → `fieldType`
→ `numFieldType` → `realFieldType` → `rcfType`

`ringType`, `fieldType` の性質が重要

Coq の多項式

`T`: `ringType` のとき, `{poly T}` ⋯ `T` 係数多項式全体
`{poly R}` も `ringType` の構造を持っている

`\poly_(i < n) E(i)`	次数が $n-1$ 次以下, i 次の係数が $E(i)$ である多項式
`c%:P`	定数 c のみからなる単項式
`'X`	変数 x のみからなる単項式
`` p`_i ``	多項式 p の i 次の係数
`size p`	多項式 p の次数 $+1$
`p.[x]`	多項式 p の x での値

Appendix Dqp の正当性

```
Definition Dqp p := dqp p %/ dqp 'X.
```

`p %/ p'` は多項式 p を多項式 `p'` で割った商
→ 余りが 0 でない可能性があるため, q-微分の正しい形式化である保証がない

```
Lemma Dqp_ok p : dqp 'X %| dqp p.

Import FracField.

Local Notation tofrac := (@tofrac [idomainType of {poly R}]).
Local Notation "x %:F" := (tofrac x).

Theorem Dqp_ok_frac p : (dqp p)%:F / (dqp 'X)%:F = (Dqp p)%:F.
```

`p' %| p` $\cdots$ p が `p'` で割り切れる

Appendix Dq と Dqp

```
Definition ap_op_poly (D : (R → R) → (R → R)) (p : {poly R}) :=
  D (fun (x : R) ⇒ p.[x]).
Notation "D # p" := (ap_op_poly D p) (at level 49).

Lemma dqp_dqE p x : (dqp p).[x] = (dq # p) x.

Lemma Dqp_Dqp'E p : Dqp p = Dqp' p.
Lemma Dqp'_DqE p x : x ≠ 0 → (Dqp' p).[x] = (Dq # p) x.

Lemma Dqp'_qbinom_poly a n :
  Dqp' (qbinom_pos_poly a n.+1) =
    (qnat n.+1) *: (qbinom_pos_poly a n).
```

- Coq Team, *The Coq Standard Library*, `https://coq.inria.fr/distrib/current/stdlib/`, 2023.
- Victor Kac, Pokman Cheung, *Quantum Calculus*, Springer, 2001.
- Mathematical Components Team, *Mathematical Components*, `https://github.com/math-comp/math-comp`, 2023.
- Mathematical Components Team, *Mathematical Components compliant Analysis Library*, `https://github.com/math-comp/analysis`, 2023.
- 中村 薫, *q-analogue*, `https://github.com/nakamurakaoru/q-analogue/tree/thesis`, 2023.