

信号処理とフーリエ変換 第2回

～Fourier 級数の収束～

かつらだ まさし
桂田 祐史

2020 年 9 月 30 日

① 本日の内容・連絡事項

② Fourier 級数

- Fourier 級数の収束
 - 実例を見よう
 - 関数列の 3 つの収束
 - Fourier 級数の収束に関するお勧めの 3 つの定理
 - Gibbs の現象

③ 参考文献

本日の内容・連絡事項

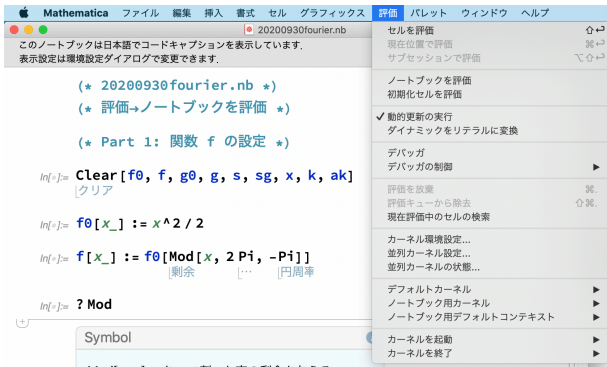
- アンケートの回答ありがとう。昼休みで問題ない、という意見が多かったです。一方で、授業の置かれている時間帯という意見もありました。それも検討するつもりです。今週中にオフィスアワーを決めて、シラバスの補足に書き、次回授業でも発表する予定です。
- 今回は、講義ノート [1] の §1.2 の部分 (フーリエ級数の収束) の内容を講義します。
収束というと、ガチガチの数学 (特に解析学) の話題のように感じられるかもしれませんが、事例を見ると自然な問題であることが分かります (というか分かってほしい)。
- 事例が大事だけれど、Fourier 解析がらみの計算は手強いので、コンピューターを利用するのが良いと考えています。この科目では Mathematica を利用することにしています (数式処理, 数値計算, グラフィックスが程よく使える)。必要なことはこちらが動画で見せますが、ぜひ自分の Mac でも確かめるようにして下さい。ライセンスが切れていて動かなくなっている人は、池田先生または私 (katurada あっと meiji ドット ac どっと jp) に連絡して下さい。

1.2 Fourie 級数の収束 1.2.1 実例を見よう

授業 WWW サイト (<http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/fourier/>) から 20200930fourier.nb を入手して開く。ブラウザで Ctrl+クリックして保存してから クリックして開くか、ターミナルで以下のコマンドを実行する。

```
curl -O http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/fourier/20200930fourier.nb  
open 20200930fourier.nb
```

一気に実行するには、Mathematica のメニュー [評価] から [ノートブックを評価] を選ぶ。



Mathematica メモ

- 現象数理学科でライセンスを購入しているので、所属する学生は利用できる。毎年4月末日にライセンスの更新がある (更新できない場合は、池田先生か桂田に相談する)。
- アプリケーション・フォルダに Mathematica.app がある (私は Dock に追加しています)。
- (新しくプログラムを作る場合) Mathematica を起動後、「新規ドキュメント」でノートブックを開き、コマンドを入力して実行する。
- コマンドの最後に `shift` + `return` とタイプする。
- 直前の結果は % で参照できる。直前のコマンドは `command` + L で呼び出せる。
- コマンドは編集して再実行できる (挿入、上書き修正、削除、などが可能)。
- ??関数名 としてマニュアルが開ける (非常に便利。これに慣れること。)
- 関数名の大文字・小文字に注意する。ほぼ例外なく、先頭は大文字である。
- ノートブックとして保存しておける (ファイル名末尾 .nb)。
- 既存のノートブックはダブルクリックで開ける。コマンドを1つ1つ `shift` + `return` で実行する以外に、[評価] → [ノートブックを評価] で順番に全部実行することもできる。

1.2.1 実例を見よう 例: $f(x) = x^2 \ (-\pi \leq x < \pi)$

$f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ は周期 2π で

$$f(x) = x^2 \quad (-\pi \leq x < \pi).$$

とする。グラフを描くことを強く勧める (連続かどうか等分かることがある)。

```
f0[x_] := x^2
```

```
g1 = Plot[f0[x], {x, -10, 10}]
```

```
f[x_] := f0[Mod[x, 2 Pi, -Pi]]
```

```
g2=Plot[f[x], {x, -10, 10}]
```

← Mod[] を使って周期 2π の関数を作る工夫

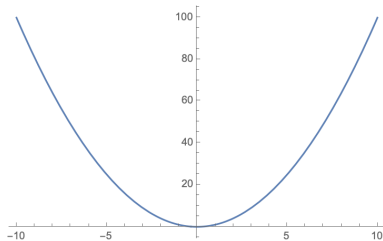


図 1: $f_0(x) := x^2$ のグラフ ($[-10, 10]$)

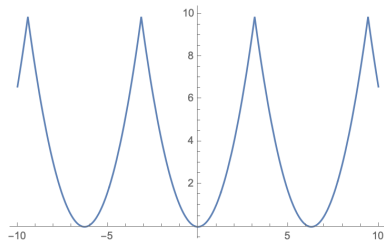


図 2: f のグラフ ($[-10, 10]$)

Mathematica の Mod[] について

細かいことのようにだが、周期関数としてグラフを描く工夫について説明する。

Mod[a, b], Mod[a, b, c]

$a \in \mathbb{R}$, $b > 0$ が与えられたとき、

$$a = bn + r \quad (n \in \mathbb{Z}, 0 \leq r < b)$$

を満たす n, r が一意的に定まる (a を b で割った商が n , 余りが $r \cdots$ よく知られている)。Mod[a, b] は、この r を返す関数である。

同様に $a \in \mathbb{R}$, $b > 0$, $c \in \mathbb{R}$ が与えられたとき、

$$a = bn + r \quad (n \in \mathbb{Z}, c \leq r < c + b)$$

を満たす n, r が一意的に定まる。この r を返すのが、Mod[a, b, c] である。

$r = \text{Mod}[a, 2\pi, -\pi]$ とすると、 r は $r \in [-\pi, \pi)$, $a - r$ は 2π の整数倍、という条件を満たすことを理解しよう。

1.2.1 実例を見よう 例: $f(x) = x^2$ ($-\pi \leq x < \pi$)

f の Fourier 級数をていねいに計算しよう。これは各自がやること (ここに書くのは確認用)。

偶関数であるから $b_n = 0$ 。

$n \neq 0$ のときは

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x^2 \cos nx \, dx = \cdots (\text{部分積分で計算}) \cdots = \frac{4 \cos n\pi}{n^2} = \frac{4(-1)^n}{n^2}.$$

(計算は結構面倒。19 ページに書いておいた。)

$n = 0$ のときは

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \, dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} x^2 \, dx = \frac{2}{3} \pi^2.$$

ゆえに

$$f(x) = \frac{\pi^2}{3} - 4 \left(\frac{\cos x}{1^2} - \frac{\cos 2x}{2^2} + \frac{\cos 3x}{3^2} - \cdots \right).$$

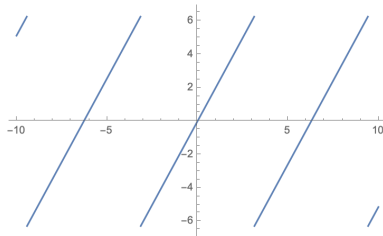
(先取りして f は周期 2π かつ連続かつ区分的に C^1 級であるから、後で紹介する定理によって、Fourier 級数は一様収束し、和は $f(x)$ に等しい。)

1.2.1 実例を見よう 例2: $g(x) = 2x \ (-\pi \leq x < \pi)$

$g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ は周期 2π で

$$g(x) = 2x \quad (-\pi \leq x < \pi).$$

とする。 g のグラフは次のようになる。 $x = (2m-1)\pi$ ($m \in \mathbb{Z}$) で g は不連続である。



g の Fourier 級数を計算しよう。 g は奇関数であるから $a_n = 0$.

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(x) \sin nx \, dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} 2x \sin nx \, dx = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi} x \sin nx \, dx \\ &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi} x \left(-\frac{\cos nx}{n} \right)' dx = \frac{4}{\pi} \left\{ \left[x \cdot \frac{-\cos nx}{n} \right]_0^{\pi} + \int_0^{\pi} 1 \cdot \frac{\cos nx}{n} dx \right\} \\ &= \frac{4}{\pi} \left(\frac{-\pi \cos n\pi}{n} + \left[\frac{\sin nx}{n^2} \right]_0^{\pi} \right) = \frac{4(-1)^{n-1}}{n}. \quad (\text{試験でミスがとても多い。}) \end{aligned}$$

1.2.1 実例を見よう 例 2: $g(x) = 2x \ (-\pi \leq x < \pi)$

ゆえに

$$(1) \quad g(x) \sim 4 \left(\frac{\sin x}{1} - \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} - \cdots \right).$$

ここで \sim は、右辺が左辺の Fourier 級数であることを表す記号である。収束と等号成立が微妙なので、 $=$ と書かずに (実際成り立たない点がある)、とりあえず \sim としておいた。

g は周期 2π かつ **区分的に C^1 級であるが、連続ではない**。後で紹介する定理によって、(1) の右辺 (g の Fourier 級数) は **各点収束し**、

- x が g の **連続点** であれば和は $g(x)$ に等しい
- x が g の **不連続点** であれば和は $\frac{g(x+0) + g(x-0)}{2}$ に等しい

(この例では、 $x = (2m-1)\pi \ (m \in \mathbb{Z})$ で $\frac{-2\pi + 2\pi}{2} = 0$)

ゆえに、 $x = (2m-1)\pi \ (m \in \mathbb{Z})$ で等式不成立、そうでない点で等式が成立する。

もしも g の $x = (2m-1)\pi$ での値を 0 に修正すると (積分で定義される Fourier 係数と Fourier 級数は変わらないので)、すべての点 x で Fourier 級数の和が $g(x)$ に等しくなる。(分かりにくいかもしれないが理解にチャレンジしよう。)

不連続点の近傍では、**Gibbs の現象**が見られるが、これについては後述する。

□

問題点を整理 収束するか、和は元の関数に等しいか

Fourier 級数は、その名の通り級数であるから、部分和

$$\begin{aligned} s_n(x) &:= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \\ &= \sum_{k=-n}^n c_k e^{ikx} \end{aligned}$$

が $n \rightarrow \infty$ のときに収束するかどうかはまず問題になる。

特に Fourier 級数の場合、和がもとの関数に等しいことが期待される。

成り立つかどうか？

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_n(x) \stackrel{?}{=} f(x)$$

1.2.2 関数列の3つの収束 関数と関数の違いを測る

数列と違って、関数列には複数の収束概念がある。

$\{s_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ が f に収束するとは、 s_n と f の違い (「距離」と言いたくなるが、それは数学語なのでここでは使わない) が 0 に近づくということだが、違いの測り方は色々ありうる。

$y = f(x)$, $y = g(x)$ のグラフを描いて、どのように違いを測るか、図で説明してみる。

1.2.2 関数列の3つの収束

関数列の収束を3つ紹介する。(関数の定義域は $[-\pi, \pi]$ とする。 \mathbb{R} とすべきかもしれないが、周期 2π の周期関数なので、同じことである。)

① 各点収束 (単純収束)

$$(2) \quad (\forall x \in [-\pi, \pi]) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} s_n(x) = f(x).$$

$\{s_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ は $[-\pi, \pi]$ で f に各点収束する、という。

任意の $x \in [-\pi, \pi]$ を定めると、 $\{s_n(x)\}_{n \in \mathbb{N}}$ は数列である。それが複素数 $f(x)$ に収束する、ということ。

分かりやすいけれど、実はあまり役に立たない。

1.2.2 関数列の3つの収束

② 一様収束

$$(3) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in [-\pi, \pi]} |s_n(x) - f(x)| = 0.$$

「 $\{s_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ は $[-\pi, \pi]$ で f に一様収束する。」という。

ある意味で自然。実はこれから色々なことが導かれる、とても良い収束である。

(関数論では大活躍する。)

区分的に連続な関数の場合は、 $L^\infty(-\pi, \pi)$ におけるノルム

$$\|g\|_{L^\infty} := \operatorname{ess.\,sup}_{x \in (-\pi, \pi)} |g(x)|$$

を用いて、(3) は次のように表せる。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|s_n - f\|_{L^\infty} = 0. \quad (L^\infty(-\pi, \pi) \text{ における } s_n \text{ と } f \text{ の距離が } 0 \text{ に収束}).$$

1.2.2 関数列の3つの収束

iii) L^p 収束 (p 次平均収束) ただし $1 \leq p < \infty$.

$$(4) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-\pi}^{\pi} |s_n(x) - f(x)|^p dx = 0.$$

$\{s_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ は $[-\pi, \pi]$ で f に L^p 収束する、という。

特に $p = 1$ の場合は、積分はグラフの囲む図形の面積を表す。

$p = 2$ の場合は、とてもよく使われる (後で詳しく説明し直す)。

$L^p(-\pi, \pi)$ におけるノルム

$$\|g\|_{L^p} := \left(\int_{-\pi}^{\pi} |g(x)|^p dx \right)^{1/p}$$

を用いると、(4) は次のように表せる。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|s_n - f\|_{L^p} = 0 \quad (L^p(-\pi, \pi) \text{ における } s_n \text{ と } f \text{ の距離が } 0 \text{ に収束}).$$

本来は、紹介した3つの収束について、実例を見せたり、それらの間の関係を説明すべきだが、それは後回しにして、Fourier 級数に関する定理を紹介する。

1.2.3 Fourier 級数の収束に関するお勧めの3つの定理

例1については次の定理がぴったりである。

定理 2.1 (連続かつ区分的に滑らかならば一様収束)

$f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ は周期 2π , 連続かつ区分的に C^1 級ならば、 f の Fourier 級数は f に一様収束する (ゆえに各点収束かつ任意の p に対して L^p 収束)。

しかし、この定理は、例2には使えない。代わりに次の定理が使える。

定理 2.2 (区分的に滑らかならば各点収束)

$f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ は周期 2π かつ区分的に C^1 級ならば、Fourier 級数は各点収束する。実際、任意の $x \in \mathbb{R}$ に対して

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_n(x) = \begin{cases} f(x) & (f \text{ が } x \text{ で連続のとき}) \\ \frac{f(x+0) + f(x-0)}{2} & (f \text{ が } x \text{ で連続でないとき}). \end{cases}$$

ここで

$$f(x+0) = \lim_{y \rightarrow x+0} f(y) \quad (\text{右側極限}), \quad f(x-0) = \lim_{y \rightarrow x-0} f(y) \quad (\text{左側極限}).$$

1.2.3 Fourier 級数の収束に関するお勧めの3つの定理

次の定理も紹介しておく (後で重要になる)。これも例2の関数に適用できる。

定理 2.3 (区分的に滑らかならば L^2 収束)

$f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ は周期 2π かつ区分的に C^1 級ならば、 f の Fourier 級数は f に L^2 収束する。すなわち

$$\int_{-\pi}^{\pi} |s_n(x) - f(x)|^2 dx \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty).$$

実は「区分的に C^1 級」という条件は、 f が $(-\pi, \pi)$ で2乗可積分 (そのことを $f \in L^2(-\pi, \pi)$ と書く)、すなわち Lebesgue 可測で $\int_{-\pi}^{\pi} |f(x)|^2 dx < +\infty$ を満たす、というより弱い条件で置き換えることが出来る。次のように定理が1行で書ける。

$$f \in L^2(-\pi, \pi) \quad \Rightarrow \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \|s_n - f\|_{L^2} = 0.$$

1.2.4 Gibbs の現象

f が区分的に C^1 級ではあるが、連続ではない場合、 f の不連続点の近くでは、部分和 s_n のグラフは「ジグザグして暴れる」。よく見ると次のことが分かる。

- 暴れる範囲の横幅は、 $n \rightarrow \infty$ のときに小さくなる (各点収束は否定しない)。
- 暴れる範囲の縦幅 (しばしば overshoot と呼ばれる) は、 $n \rightarrow \infty$ としても小さく **ならない** (だから一様収束はしない！)。

この現象を発見者にちなんで **Gibbs の現象** と呼ぶ (Gibbs [2], [3])。

```
In[54]:= Manipulate[Plot[{sg[n, x], g[x]}, {x, -10, 10},  
PlotRange -> {-4, 4}, PlotPoints -> 500], {n, 1, 100, 1}]
```

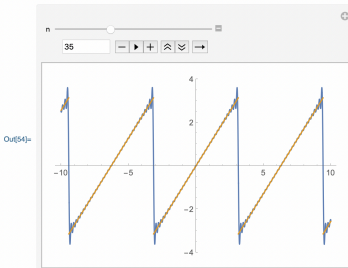


図 3: 青線はオレンジの線から上下に突き出て、その長さは n を大きくしても変わらない

授業後の追加 (補足) f の Fourier 級数の計算

$n \neq 0$ のとき

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx \, dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x^2 \cos nx \, dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} x^2 \cos nx \, dx \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} x^2 \left(\frac{\sin nx}{n} \right)' dx = \frac{2}{\pi} \left(\left[x^2 \frac{\sin nx}{n} \right]_0^{\pi} - \int_0^{\pi} 2x \cdot \frac{\sin nx}{n} dx \right) \\ &= \frac{2}{\pi} \left(0 - \frac{2}{n} \int_0^{\pi} x \sin nx \, dx \right) = \frac{4}{n\pi} \int_0^{\pi} x \left(\frac{\cos nx}{n} \right)' dx \\ &= \frac{4}{n\pi} \left(\left[x \frac{\cos nx}{n} \right]_0^{\pi} - \int_0^{\pi} 1 \cdot \frac{\cos nx}{n} dx \right) = \frac{4}{n\pi} \left(\pi \frac{\cos n\pi}{n} - \left[\frac{\sin nx}{n^2} \right]_0^{\pi} \right) \\ &= \frac{4(-1)^n}{n^2}. \end{aligned}$$

f の Fourier 級数は

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nx = \frac{\pi^2}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{n^2} \cos nx \\ &= \frac{\pi^2}{3} - 4 \left(\frac{\cos x}{1^2} - \frac{\cos 2x}{2^2} + \frac{\cos 3x}{3^2} + \cdots \right). \end{aligned}$$

参考文献

今回の内容は、講義ノート [1] の §1.2 そのままです。Gibbs の報告は有名な *Nature* なんですね。

- [1] 桂田祐史：「信号処理とフーリエ変換」講義ノート, <http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/fourier/fourier-lecture-notes.pdf>, 以前は「画像処理とフーリエ変換」というタイトルだったのを直した。(2014～).
- [2] Gibbs, J. W.: Fourier Series, *Nature*, Vol. 59, 200, (1898), The collected works of J. Willard Gibbs. Vol. II (<http://catalog.hathitrust.org/Record/001477419>) に収録.
- [3] Gibbs, J. W.: Fourier Series, *Nature*, Vol. 59, 606, (1899), The collected works of J. Willard Gibbs. Vol. II (<http://catalog.hathitrust.org/Record/001477419>) に収録.