

# 脳を学ぶ上で大事な数学シリーズ

後藤 優仁

2018 年 10 月 2 日

## 1 はじめに

### 1.1 本書の主旨, 自己紹介

さて, この資料を覗いている貴方は, 実学 (さいあんす) を重視する優秀な塾生であるのでしょうか!! すばらしい!!!

慶應義塾において, 塾生同士の繋がりは尊ぶべきであり, その立場に関わらず学び教えあう 半学半教 の精神が大事であると福澤先生は仰っております.

よって僕も, 未熟者ではありますが後進の育成のため, ひいては将来僕に教えてくれうる人材への先行投資として, この資料を作成することにしました. 脳は学ぶにはあまりにも難しく, 脳を学ぶ事で脳を病んでしまうものですが, とともに頑張りましょう!

最初にことわっておくと, 本書ではある程度までの分かりやすさを担保しますが, 逆にある程度以上は「自明」で片づけます. 初学者はもちろん「自明じゃねえよふざけんな!」と思う事でしょうが, このイラ立ちが大事なのです. 自明なものを自明と思えないという事は, 読者の理解力・基礎力が足りていないという事です.

分からなかった単語や数式をググリ, 本を借り, 先生や先輩に聞き, 手計算で確認し, 実装してプロットした結果を眺める... このようにして崇める事で, いつしか調べていた事が自明であった事に気付けるようになります. 中学数学に対して「自明じゃねえよ」なんて考える人はいませんね? それと一緒に.

### 1.2 本書のカバーする内容

本書は筆者の気が向いた時に少しずつ更新していくので, タイミングによってはほとんど書いてないと思いますが, 最終的に目指している点をここに記します.

基本的には脳神経科学, 特に脳波を用いる際に必要になってくる数学を全体集合として, 部分集合を小出しにだしていく感じを考えています. 補集合については更新を待つか諦めて独学をする, あ

るいは筆者に書くよう申請をしてください。従って本書のカバーする内容はおおまかに分けて

- 前提となる基礎的な数学
- 脳波を代表とした信号を処理する信号処理数学
- ANOVA や  $t$  検定, 簡単な機械学習などの統計的数学

などといった感じになると思います。軟弱な SFC 生の多くはいらないと考えるでしょうが, 少なくとも他大学の脳科学の研究室ではどれも見戲のごとき基礎となっています (実際学部 1.2 年で大体やってる)。がんばりましょう。

## 2 基礎を学ぶ

### 2.1 掛け算

### 2.2 掛け算とは何か

掛け算とはとても難しいものです。

何故なら, 足し算はユークリッド空間から離れた複雑な空間でも, 大抵は普通にこなすことが出来ますが, 掛け算はユークリッド空間をほんの少し離れてしまっただけで難解になってしまうからです。

逆に言うと足し算では違いが分からない様々な空間も, 掛け算で考えると全く異なる空間であった事が理解できると言えます。

ちなみに, 割り算になると難しすぎて頭が爆発します。

引き算が足し算で表せるのは自明なので割愛 (割り算も掛け算で表せるだろと思った君, すまない僕もそう思う。ただ難しいらしい。)

信号処理や統計の勉強をしていくには, 掛け算は非常に大切なものです。まずは掛け算の偉大さと深淵に触れましょう。

#### 2.2.1 数ってなあに？

先程, ユークリッド空間やらなんやらといった言葉が出てきましたが, 簡単にいうとこれらは全て別の「数」として案が得る必要があるため, 空間と名付けています。

まずは単一の数と複数の数に分けるところからいきましょう。

### 2.2.2 単一の数スカラー

単一の数, スカラー数です. 高校での数学を真面目に受けていた人間なら聞き覚えがえるでしょう. スカラー数とは最も簡単な数... すなわち僕達が昔から親しんできた「数」のことです! 簡単ですね! 以上です.

スカラー数の掛け算は僕たちが直感的にやっている

$$3 * 5 = 15 \quad (1)$$

の事です.

### 2.2.3 複数の数からなる積

複数の数からなる数には色々あります.

- ベクトル
- 複素数
- 行列

等です. これらはスカラー数の掛け算とは全く違う世界になります. 心してかかりましょう. 高校以上の数学は非常に難しいもので, 僕も全く分からずにおいて行かれましたが, どうか理解するための最初の第一歩は, 「世の中には (スカラー) 数じゃない数があるらしい」と知る事です. 僕はこれを理解するまでに 4 年の歳月を費やしてしまいました.

では, そもそも何故スカラー以外の数を考える必要があるのでしょうか?

普通に生きていてベクトルや複素数といったものを自然の中に見る事はないでしょう (あるいは啓蒙を高めると見る事が出来るのやもしれない).

しかしスカラー数には限界があるのです. 何故なら, 基本的にスカラー数とは直線であるからです!

0 があって 1 があり, その次に 2 が来るのは小学 2 年生の数直線ですが, 小学 4 年生頃には「どうやら 0 と 1 の間にも小数や分数があるらしい」と知ります. 次に中学になり, 0 の向こう側には同じだけの数の負の数があり, 更には  $\sqrt{\phantom{x}}$  がつく数などもある事を知ります. そして少し飛びますが高校では, 数直線の右と左に終わりはなく, 無量大数という領域に飛んでいる事を知る. ここまでがスカラーの学習順序ですが, いずれも 1 本の直線を細かく見たり, あるいはずっと先を見ているだけな事に気付くでしょう.

ただの直線であるスカラーでは記述できる情報が少ないため, 不都合があるから別の数を考える必要があったわけです. スカラーっぽいやつらを複数束ねてまとめた「数」を新しく定義してやれば表現できる情報量は各段に増え, 世界が広がります.

記述する要素が増えれば情報が増えるのは自明ですね.

#### 2.2.4 ベクトルの積

ベクトルとは二次元の場合は 2 つ, 三次元の場合は 3 つの数を束ねたものです.

数を複数束ねると, その間に比が生まれ, 角度が生まれます.

これが先述した, 増える情報量であり, スカラー数との決定的な違いです.

ベクトル同士を掛け合わせるとき, どうするでしょうか?

一番素朴な形は下記の通りでしょう.

$$(x_1, y_2) * (x_2, y_2) = (x_1 * x_2 + y_1 + y_2) \quad (2)$$

これをベクトルの内積と言います.

そして, これは 2 つのベクトルの絶対値の積に互いになす角の  $\cos$  をかけたものと同値です. 確認してみましょう.

ある 2 つのベクトルを考えてください.

1 つは  $(r_1 \cos x, r_1 \sin x)$  で, もう一つは  $(r_2 \cos y, r_2 \sin y)$  です.

全ての比は  $\cos x : \sin x$  で表せるので上記の表し方が大丈夫なのは自明です.

では内積を考えます.

$$(r_1 \cos x, r_1 \sin x)(r_2 \cos y, r_2 \sin y) = r_1 r_2 (\cos x \cos y + \sin x \sin y) \quad (3)$$

加法定理より

$$r_1 r_2 (\cos x \cos y + \sin x \sin y) = r_1 r_2 \cos(x - y) \quad (4)$$

加法定理が成り立つのはオイラーの公式より自明です.

たしかに絶対値の積と  $\cos$  をかけたものになっていますね. ここからベクトルの内積というものが何を表しているのかが分かるのですが, いったん置いといて次へ進みます.

#### 2.2.5 $\sin \cos$ そして直交

2 つのベクトルが直交するとき, 積は 0 になります.

証明

ここで,  $y$  が  $x + \pi/2$  であると仮定します.

$$\cos y = \cos(x + \pi/2) = -\sin x \quad (5)$$

$$\sin y = \sin(x + \pi/2) = \cos x \quad (6)$$

$$(r_1 \cos x, r_1 \sin x)(r_2 \cos y, r_2 \sin y) = r_1 r_2 (\cos x \cos y + \sin x \sin y) = 0 \quad (7)$$

このように、直交するということは内積が 0 になるということだと証明できます。当然  $x$  と  $y$  の大小関係が逆でも成り立ちます。

少し余談になりますが、実はこれものすごく偉大ですごい事なのです。ベクトルの直交は内積が 0 という事は 2 次元ベクトルなら自明ですね。しかしこの性質は 2 次元に限らないのです。つまり無限次元のベクトルがあっても、その直行性について定義できちゃうのです！！

やばいですね！

## 2.2.6 ベクトルの積再訪, 外積

さて、まだよくわかりませんね。

先程てきとうに書いた「素朴な積」は内積ですが、 $x$  同士  $y$  同士の掛け算でした。

何故こうなるのでしょうか...?  $x$  と  $y$  をかけても良さそうですね。

ここはあまり必要ありませんが、 $x$  と  $y$  を掛け合わせたときに出てくるのは内積に対して外積といいます。

内積に対して  $\cos$  が  $\sin$  になります。

証明

上記と同様に加法定理より

$$r_1 r_2 (\cos x \sin y + \cos y \sin x) = r_1 r_2 \sin(x + y) \quad (8)$$

簡単ですね。

## 2.2.7 内積と外積の意味

内積と外積の定義を見てきましたが、その意味とは何でしょう？

内積は  $\cos$  がついていますね！

$\cos$  がついていうのは非常に大切です。

$\cos$  というのは「同じ方向を向いたら正、直交したら 0、反対なら負」なのです。

つまり以心伝心～犬猿の仲なのです。右脳と左脳のようなものですね (正か負かは言わない)

このように関係性のものさしとして  $xx + yy$  を使うのが内積です！

外積は何かって？

$\sin$  がついています。つまり、どれくらい無関心でいるかの指標ですね！

### 2.2.8 その他の演算

ベクトルの掛け算のうち、ここでは扱わないが非常に重要な定義の一つとして、ドット積があります。

ドット積とは、同じ長さの数列の各要素を掛け合わせ、その値を足し合わせて一つの値として出力したものです。

そう、つまり内積の事です！

ドット積は実質 (ユークリッド空間では) 内積と同じ扱いをされます。

こいつは代数学・幾何学において非常に大事になる上、畳み込みの基礎となるものです！

そしてそれはつまり、フーリエ変換やウェーブレット変換の基礎になる偉大な掛け算です！！

ベクトルの掛け算を学ぶ意味は、畳み込みを理解しフーリエ変換を理解する事にあるのです！！

凄いですね！！

### 2.2.9 複素数の積

上記ベクトルと同様、複素平面上では  $r(\cos x + i \sin x)$  というものを考えます。

上記同様、一般的な積を考えてみましょう。

$$r_1(\cos x + i \sin x)r_2(\cos y + i \sin y) = r_1r_2(\cos x \cos y - \sin x \sin y + i \sin x \cos y + i \cos x \sin y)$$

上記は加法定理より

$$r_1r_2(\cos(x+y) + i \sin(x+y)) \quad (10)$$

となります。

ベクトルの内積と似てはいますが、決定的な違いがあります。

掛け算をすると角度の足し算になっているのです！

### 2.2.10 複素数の逆数

地味に複素数の偉大なところですよ。

逆数... つまり  $\frac{1}{x}$  が出来れば割り算はできますよね？

ベクトルや行列は複数の数を束ねただけなので逆数と言われてもこまりますが、複素数は割り算が簡単にできます。

何故なら複素数は見た目上スカラーっぽいですからね！

逆数を取るという事は、複素数の割り算は角度の引き算になりますね。

### 2.2.11 複素平面の掛け算の意味

複素平面で掛け算をすると角度の足し算になるようだ！  
つまり回転ですね。これの何がうれしいかって言うと、計算が超楽になるのです。

そしてこの性質が大正義であるオイラーの公式に、必然か神の悪戯か、結びついているのです。

### 2.2.12 大正義オイラーの公式

証明は別の資料にしますが、人類の至宝とされ、僕が師匠に最初におそわった偉大な魔術である、オイラーの公式です。刮目せよ。

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad (11)$$

美しいですね！  
更にこいつの特殊形がこうなります。

$$e^{i\pi} + 1 = 0 \quad (12)$$

美しすぎますね！！

この人類の至宝をもって、我々は脳波と戦っていくことになります。  
Euler's formula を制するものは脳を制するのです。  
具体的に言うとドット積同様、フーリエ変換の基本の一つになっています。  
そしてフーリエはウェーブレットの基本となっています！！  
そしてウェーブレット変換はヒルベルト変換の基本なのです！！  
そしてヒルベルト変換まで理解した君は気付くのです。脳波解析とはなんだったのか、その有難みと問題点に！！

### 2.2.13 行列とは何か

行列とはただの数字の羅列.. そう思っていないか？  
その通りです。  
しかしせっかく今までベクトルと複素数の掛け算の意味を考えてきたので、行列でも意味を考えてみましょう。

行列の内積とは、実は連立方程式を表しているのです！！  
凄いですね！！  
さらにさらに、行列の内積は回転でもあります！  
超すごいですね！！

#### 2.2.14 行列の内積

すまん. Tex で記すのめんどう.  
ググれ.  
要は縦 \* 横だ.

#### 2.2.15 ベクトルの内積の拡張としての内積

ベクトルの内積は  $x, y$  をそれぞれ対応するやつ同士かける事でした.  
行列の場合は... なんと, 横 2 列同士, 縦 2 列同士の掛け算はできないのです...

ここが行列の厄介なところであり, 僕が完全に理解できてない所以でもあるのですが, 行列はすごい性質 (上記) をもっているが積の交換法則

$$xy = yx \quad (13)$$

がぶっ壊れてる世界なのです. なんかすごいですね!!  
行列の世界では交換法則が成り立たないため, 行列でベクトルの内積を計算する際には順番をしっかりと守らないといけません.

#### 2.2.16 連立方程式としての行列

連立方程式は大丈夫ですね?

$$a_1x + b_1y = c_1 \quad (14)$$

$$a_2x + b_2y = c_2 \quad (15)$$

このような奴らですね. よく見てください.

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}$$

このような式になっているのです!

つまり, 行列を解くということは連立方程式を解くことに他ならないのです. これは機械学習とかやりたければ圧倒的に崇めるべき基礎です.

ちなみに, この解くという行為には逆行列や一般化逆行列を用います. 一般化逆行列は解が定まらないはずの時にごり押しで最適解をだしてくれるやつです. ムーアペンローズが有名ですね!

#### 2.2.17 行列の積の回転の性質

行列の積を計算することは知らず知らずのうちに複素平面みたいに回転する事です.  
次の行列を見てみましょう.

$$\begin{pmatrix} \cos x & -\sin x \\ \sin x & \cos x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos y \\ \sin y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos x \cos y - \sin x \sin y \\ \sin x \cos y + \cos x \sin y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(x+y) \\ \sin(x+y) \end{pmatrix}$$



行列の積は回転をも意味するのです！うーんよくわからん！  
けどなんかすごそう！！

行列の掛け算が脳にどうやって役に立つかって？

僕もよくわかってない。今後の勉強課題だなあ。  
やはり回帰とかに使うからか？あるいは活動源推定？

誰か教えてください。

## 2.2.18 最後に

掛け算について習いたての身ですが駆け足でまとめました。  
謎だ。やはりよく分からない。  
掛け算について理解をする事は、信号処理やデータ処理をするためにとても大切なことです。むづかしい数学をやるためには必須事項です。特に複素数の偉大さ、オイラーの公式の神々しさに早めに気付く事は、脳の理解への大きな一歩となります。  
がんばっていきましょう。

需要があれば続編を出していくぞ！

## 2.3 三角関数

### 2.3.1 三角比とは

三角関数の前に、まずは三角比から復習しましょう。三角比とは、 $\sin x$  や  $\cos x$   $\tan x$  といった具合に三角形の辺の比を表す幾何学の方法でした。直角三角形を考えた時、横の長さが  $\cos$ 、縦の長さが  $\sin$ 、そして斜辺の長さが  $\tan$  で表せるのでした。

あくまで辺の比としてだせるので、あとで絶対値分かける必要がありますが、それでも非常に便利なものです。高校数学では、結局辺の長さや比を覚えているものでしか使えないため、三角比の勉強をする意味に苦しんだことと思います。

$$\sin 45^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \quad (16)$$

$$\cos \pi = -1 \quad (17)$$

こんなやつですね！

$\sin$  が縦、 $\cos$  が横、そして  $\tan$  が傾きを表しているので、基本的な直角三角形であればその場です

ぐ計算できますね？

### 2.3.2 三角比の公式

三角比には、いくつか公式があります。ここを暗記で片づけるのは阿呆のする事です。いったん確認してみましょう。

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (18)$$

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (19)$$

$$\tan^2 \theta + 1 = \frac{1}{\cos^2 \theta} \quad (20)$$

式 (??) については自明ですね。傾きです。

式 (??) も自明です。ピタゴラスの定理です。

式 (??) は一寸ややこしいですが、式 (??) を用いれば秒で片づけられます。

このように、三角比の公式というのはおまじないではなく、常識なのです。10+20 を暗記する人はいませんね？

### 2.3.3 三角関数

さて、三角比がどんなものか分かったうえで、それぞれの三角比を関数として考えてみます。

$\sin x$  は  $x$  が  $0 + 2\pi n$  の時に 0,  $\pi/2 + 2\pi n$  の時に 1,  $\pi + 2\pi n$  の時に 0,  $3\pi/2 + 2\pi n$  の時に -1 を常に通る、その間を滑らかな曲線で結んだ関数になります。n の値は何周目かを表します。

$\cos x$  も同様にして 1, 0, -1, 0 となっています。

$\tan x$  は一寸特殊で、三角形の斜辺の傾きを表すという性質上、端がありません。よって  $x = 0$  の時には 0, で正負方向に対称で  $\pi/2 + \pi n$  で  $\infty$  または  $-\infty$  を極限としてとんでいきます。

ここまでは常識ですね？今時小学生でも知ってるかもしれません。

さて、こいつら三角関数の何がすごかって、超単純な周期関数である事です。

さらに、実は  $\sin$  と  $\cos$  に限って言えば位相が違うだけでその形は全く同じなのです！！！！みていてください。

$$\cos x = \sin(x + \pi/2) \quad (21)$$

こうなっているのです！！やばいですね！！

### 2.3.4 加法定理

これはオイラーの公式を用いる事で、覚えていなくてもその場で導出できます。みててください。

$$e^{i\alpha+\beta} = \cos(\alpha + \beta) + i \sin(\alpha + \beta) \quad (22)$$

指数法則より、

$$\begin{aligned} e^{i\alpha+\beta} &= e^{i\alpha} e^{i\beta} \\ &= (\cos \alpha + i \sin \alpha)(\cos \beta + i \sin \beta) \\ &= (\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta) + i(\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta) \end{aligned} \quad (23)$$

ここで再び式 (??) と見比べると、式 (??) の実部が  $\cos$ 、虚部が  $\sin$  の加法になっている事が分かります。ここからさんかく関数の加法定理は

$$\sin(\alpha + \beta) = (\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta) \quad (24)$$

$$\cos(\alpha + \beta) = (\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta) \quad (25)$$

と証明できます。例のごとく  $\tan$  は一寸面倒なので、自分で証明してみてください。

### 2.3.5 正弦と余弦

$\sin$  と  $\cos$  の関数の定義は分かりましたが、それがなんで嬉しいのでしょうか？  
これを知るためには、 $\sin$  と  $\cos$  の関係はどんなものがあるのか考える必要があります。

ここで前回やった掛け算が出てきます。

任意の  $\sin$  関数と  $\cos$  関数の積を考えてみます。

$\sin mx$  と  $\cos nx$  です。

ここで  $r_1, r_2$  は振幅、 $m$  と  $n$  は角周波数を示していますので、異なる周波数の三角関数になっています。

こいつらの掛け算を考え、さらにそいつを積分してみます。

$$\int_{-\infty}^{\infty} r_1 \sin mx r_2 \cos nx dx = \int_0^{2\pi} r_1 \sin mx r_2 \cos nx dx = 0 \quad (26)$$

三角関数は  $2\pi$  周期で同じ波形の繰り返しになっているので、範囲が  $\infty$  から  $-\infty$  じゃなくていいのは自明ですね。

三角関数は周期関数なので、それぞれが積分すると 0 なのは自明ですが、更に積の積分も 0 になるのです！！

これはすごい！！

### 2.3.6 関数の内積

さて、ここで掛け算の復習です。ベクトルの内積の定義を覚えていますか？

そう、対応する次元の要素を掛け合わせたものの総和でしたね！

これ... 関数でも使えそうじゃないですか！？

同じ  $x$  の値の時の  $y$  同士をかけ、その足し合わせをするのもやってる事は同じなのです！！

これを使うと、すごい事がおきます。そう、関数に内積を定義できるのです！！素晴らしい！！

ただし注意する必要があるのは、ベクトルでは総和を  $\Sigma$  で表していましたが、関数の場合は  $x$  が離散値ではなく連続値をとるため、総和は  $\Sigma$  でなく  $\int$  で表すという事です。

いずれにせよ、掛け算の総和で内積を定義できる事に変わりはないです。これは崇める必要がありますね！！

そしてもう一つ、ベクトルにおいて内積が 0 になるとどうなっていましたか？

そう、直交です！！

ベクトルの内積を関数の内積に拡張する事ができ、ベクトルの内積が 0 という事は直交を表す... すなわち関数についても直行性を定義する事が出来るのです。

$\sin$  と  $\cos$  は直交する関数なんですね！！すごい！！

### 2.3.7 直交性

ここでは関数の直行性については細かい話は省きますが、直交する関数 2 つ ( $\sin$  と  $\cos$ ) を用意できたなら、これを使えばすべての関数を表す事が出来ます。

そりゃそうですねー。複素数や直交座標系と同じノリです。

つまり... 全ての (周期) 関数は, 異なる振幅, 周波数の三角関数の足し合わせによって表す事ができるのです!!! 素晴らしい!!! 素晴らしすぎますね!!!

### 2.3.8 フーリエ変換への一歩

前項での内容を式に表すようになります. よく見てください.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nt) + b_n \cos(nt) \quad (27)$$

ここで, 式 (??) はすべて  $\sin, \cos$  の値が 0 になる角度の際に吐き出される値も 0 になるものですが, 実世界においてはそううまくはいかず, DC 電源につないでいたらその分基準値が上昇します. そこで式 (??) を改造します.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nt) + b_n \cos(nt) \quad (28)$$

ここで  $a_0$  は DC 電源の分です.

脳波は時間によって変化する時間関数ととらえる事が出来るので, この方法で脳波を三角関数に分解して表現する事が出来るのです!!!

これが三角関数を崇める理由です.

そしてこの, 時間関数  $f(t)$  を三角関数の和に変換する事をフーリエ変換といいます. 詳しくは今度.

### 2.3.9 大正義オイラーの利用

とはいえ, 三角関数を  $\infty$  に足し合わせるというのも酷な話で, 計算が面倒なこと面倒なこと...

どうにかならんもんか...

ん? 三角関数の足し合わせ? どこかで聞きましたね?

そう, 式 (??) に表した, 我らが至宝オイラーの公式です!!!

オイラーの公式を用いる事で, 三角関数の足し合わせは指数関数で表せます. これを使う事で劇的に計算を楽にする事ができるのです!

ただ, オイラーの公式には  $\sin$  の前に謎の記号  $i$  がついています. 一体こいつはなんなのでしょう. 次の節では, 虚数と複素数について学びます.