

Weave による文書作成のテスト

黒木玄

2019-03-13

目次

1	ガンマ函数とベータ函数	2
1.1	ガンマ函数のグラフ	2
1.2	ガンマ分布とベータ分布の密度函数のグラフ	3
1.3	上で使ったガンマ函数の公式	4
2	Riemann のゼータ函数	5
2.1	Riemann のゼータ函数の絶対値の対数の heatmap	5
2.2	Riemann のゼータ函数の絶対値の $\text{Re } s = 1/2$ 上の様子	5
2.3	Riemann のゼータ函数の $\text{Re } s = 1/2$ 上での複素数値	6
2.4	Riemann のゼータ函数の $\text{Re } s = 0.6$ 上での複素数値	7
3	手書きのノート	8
3.1	ガンマ函数とベータ函数入門 (1)	8
3.2	ガンマ函数とベータ函数入門 (2)	9
3.3	Hurwitz のゼータ函数とガンマ函数の関係	10

ノートブック Convert ipynb to html, tex, pdf を実行すると, このファイルから jmd, html, tex, pdf ファイルが作成される. jmd ファイルは Julia 言語のコードを含む markdown ファイルである.

```
using Plots
gr()
ENV["PLOTS_TEST"] = "true"
using SpecialFunctions
using Distributions
using SymPy
```

1 ガンマ関数とベータ関数

ガンマ関数とベータ関数は次のように定義される: $\operatorname{Re} s, \operatorname{Re} p, \operatorname{Re} q > 0$ のとき

$$\Gamma(s) = \int_0^\infty e^{-x} x^{s-1} dx,$$
$$B(p, q) = \int_0^1 x^{p-1} (1-x)^{q-1} dx$$

と定義される.

注意: 複数行の数式は二重のドルマークで囲んだ aligned モードを使うことにした. `weave()` 関数で作成した tex ファイルを訂正を施す必要がある.

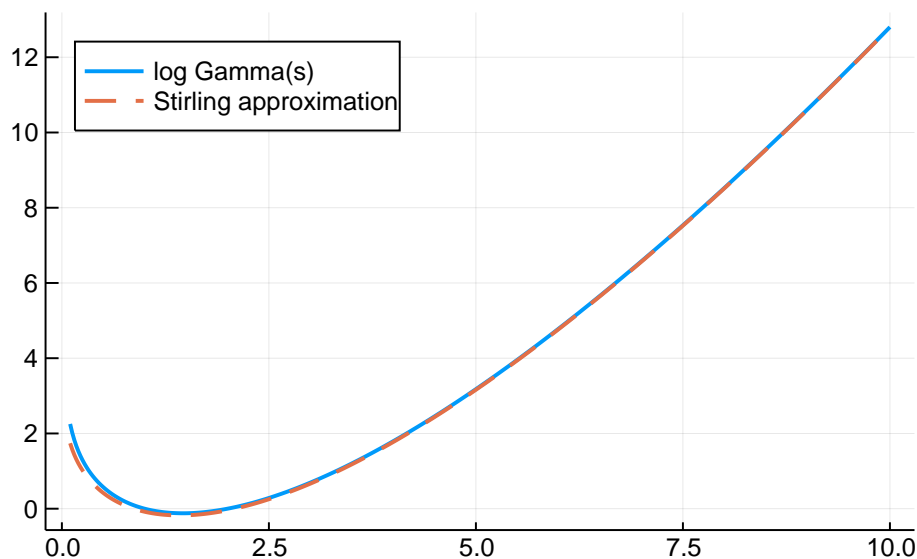
1.1 ガンマ関数のグラフ

ガンマ関数は階乗の連続的補間になっており, 急激に増大する関数になる. だから, グラフを描き易いように対数を取ったガンマ関数のグラフを描いてみよう. せっかくなので, グラフの中で Stirling の近似公式

$$\log \Gamma(s) \approx s \log s - s - \frac{1}{2} \log s + \log \sqrt{2\pi} \quad \text{as } s \rightarrow \infty$$

の右辺と比較してみよう. 以下のプロットを見ればわかるようにほぼぴったり一致している.

```
lstirling(s) = s*log(s) - s - log(s)/2 + log(sqrt(2*pi))
s = range(0.1, 10, length=400)
plot(size=(500, 300), legend=:topleft)
plot!(s, lgamma.(s), label="log Gamma(s)", lw=2)
plot!(s, lstirling.(s), label="Stirling approximation", ls=:dash, lw=2)
```



1.2 ガンマ分布とベータ分布の密度関数のグラフ

$$\theta, k, a, b > 0$$

に対して、ガンマ分布とベータ分布の確率密度関数がそれぞれ次のように定義される:

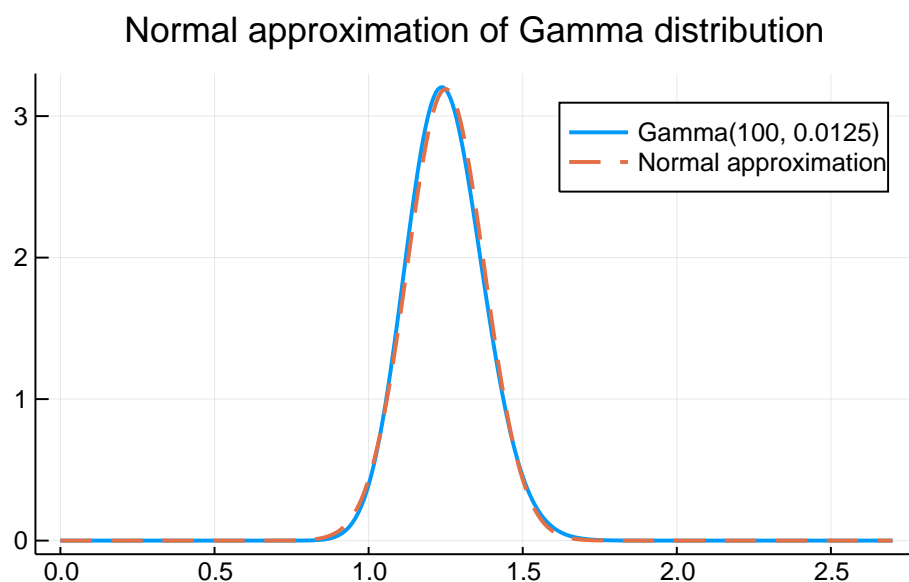
$$p(x) = \frac{1}{\theta^k \Gamma(k)} e^{-x/\theta} x^{k-1} \quad (x > 0),$$
$$q(x) = \frac{1}{B(a, b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1} \quad (0 < x < 1).$$

これらは k, q, b が大きなとき、それぞれ正規分布の確率密度関数

$$f(x|\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)}$$

の $(\mu, \sigma^2) = (k\theta, k\theta^2), (a/(a+b), ab/((a+b)^2(a+b+1)))$ の場合によく近似されるようになる (中心極限定理の特別な場合). そのことをグラフを描いて確認しよう.

```
k, θ = 100, 1/80
gdist = Gamma(k, θ)
ndist = Normal(k*θ, √k*θ)
x = range(0, 2.7, length=400)
plot(size=(500, 300))
title!("Normal approximation of Gamma distribution", titlefontsize=12)
plot!(legend=:topright)
plot!(x, pdf.(gdist, x), label="Gamma($k, $θ)", lw=2)
plot!(x, pdf.(ndist, x), label="Normal approximation", ls=:dash, lw=2)
```

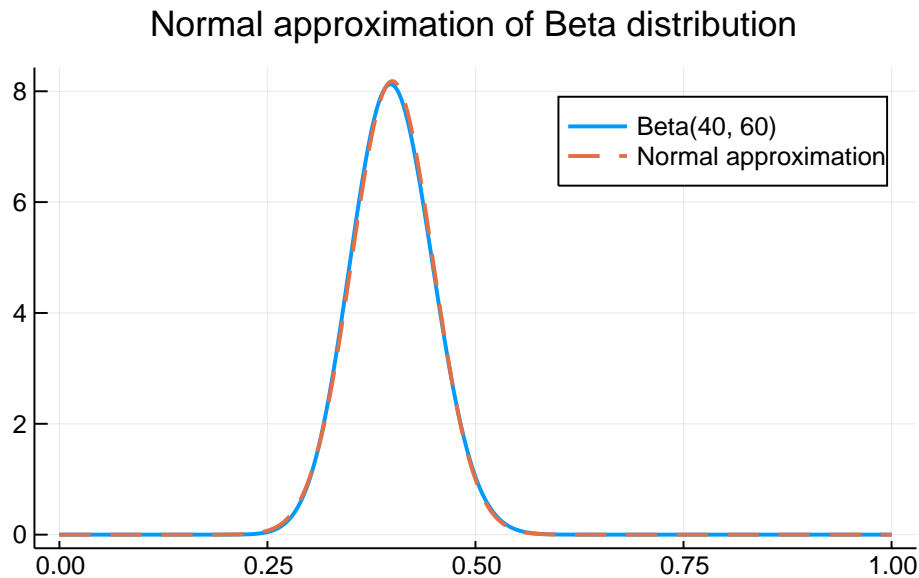


```
a, b = 40, 60
bdist = Beta(a, b)
ndist = Normal(a/(a+b), √(a*b/((a+b)^2*(a+b+1))))
x = range(0, 1, length=400)
```

```

plot(size=(500, 300))
title!("Normal approximation of Beta distribution", titlefontsize=12)
plot!(legend=:topright)
plot!(x, pdf.(bdist, x), label="Beta($a, $b)", lw=2)
plot!(x, pdf.(ndist, x), label="Normal approximation", ls=:dash, lw=2)

```



1.3 上で使ったガンマ関数の公式

上で使ったガンマ分布の確率密度関数 $p(x) = e^{-x/\theta} x^{k-1} / (\theta^k \Gamma(k))$ ($x > 0$) が確率密度関数であることを示すためには、その 0 から ∞ までの積分が 1 になること、すなわち、

$$\int_0^{\infty} e^{-x/\theta} x^{k-1} dx = \theta^k \Gamma(k) \quad (\theta, k > 0)$$

が成立することを示さなければいけない。この公式は左辺を $x = \theta y$ で置換することによって得られる。

そのことは SymPy を使っても確かめられる。(注意: 以下の計算は θ を SymPy の変数として使用しているので Python 2.7 では不可能. Python 3.x を使いましょう.)

```

k, θ, x = symbols("k θ x", positive=true)
sol = simplify(integrate(exp(-x/θ)*x^(k-1), (x, 0, oo)))
solstr = replace(sympy.latex(sol), "θ"=>"\\theta")
display("text/html", raw"$$$\\int_0^{\\infty} e^{-x/\\theta} x^{k-1} \\, dx = "
      * solstr * raw"$$$");

```

$$\int_0^{\infty} e^{-x/\theta} x^{k-1} dx = \theta^k \Gamma(k)$$

注意: LaTeXStrings.jl の latexstring() を使用して同じ数式を表示させると, weave(~, doctype="md2html") でうまく数式が表示されなくなる。上のよう mimetype text/html で display を使用し, 行末に ; を付けばうまく表示されるようになる。

2 Riemann のゼータ函数

Riemann のゼータ函数は $\operatorname{Re} s > 1$ において

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} \quad (\operatorname{Re} s > 1)$$

と定義され, 唯一の極 $s = 1$ を除いた複素平面全体に解析接続される.

Riemann のゼータ函数の $0 \leq \operatorname{Re} s \leq 1$ (critical strip) における零点を非自明な零点と呼ぶ.

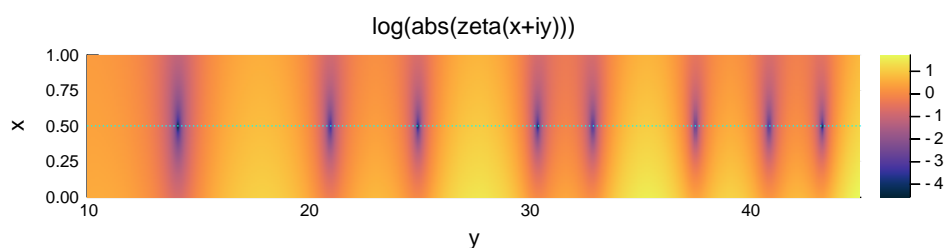
Riemann 予想: Riemann のゼータ函数の非自明な零点はすべて直線 $\operatorname{Re} s = 1/2$ に乗っている.

Riemann のゼータ函数の非自明な零点は素数の分布の精密な評価と関係している.

Riemann 予想の成立を (数学的な証明にはならないが) 数値的な計算で確認してみよう

2.1 Riemann のゼータ函数の絶対値の対数の heatmap

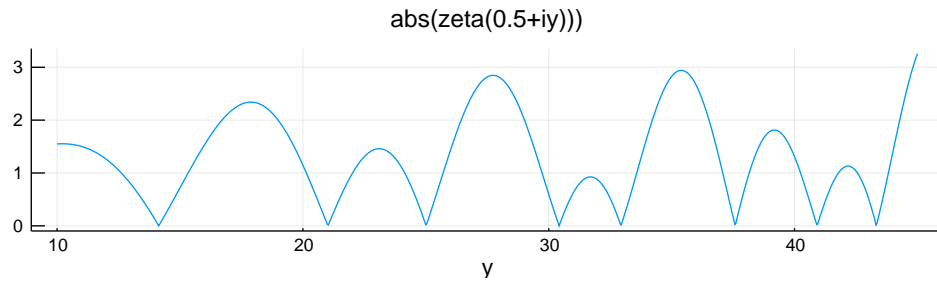
```
f(s) = max(min(log(abs(zeta(s))), 3), -5)
x = range(0, 1, length=100)
y = range(10, 45, length=400)
s = @. x + im*y'
plot(size=(750, 180))
title!("log(abs(zeta(x+iy)))", titlefontsize=12)
heatmap!(y, x, f.(s), color=:thermal)
xlabel!("y")
ylabel!("x")
hline!([0.5], ls=:dot, color=:cyan, label="")
```



2.2 Riemann のゼータ函数の絶対値の $\operatorname{Re} s = 1/2$ 上の様子

```
f(s) = abs(zeta(s))
x = 1/2
y = range(10, 45, length=1000)
s = @. x + im*y
plot(size=(720, 200))
title!("abs(zeta(0.5+iy))", titlefontsize=12)
```

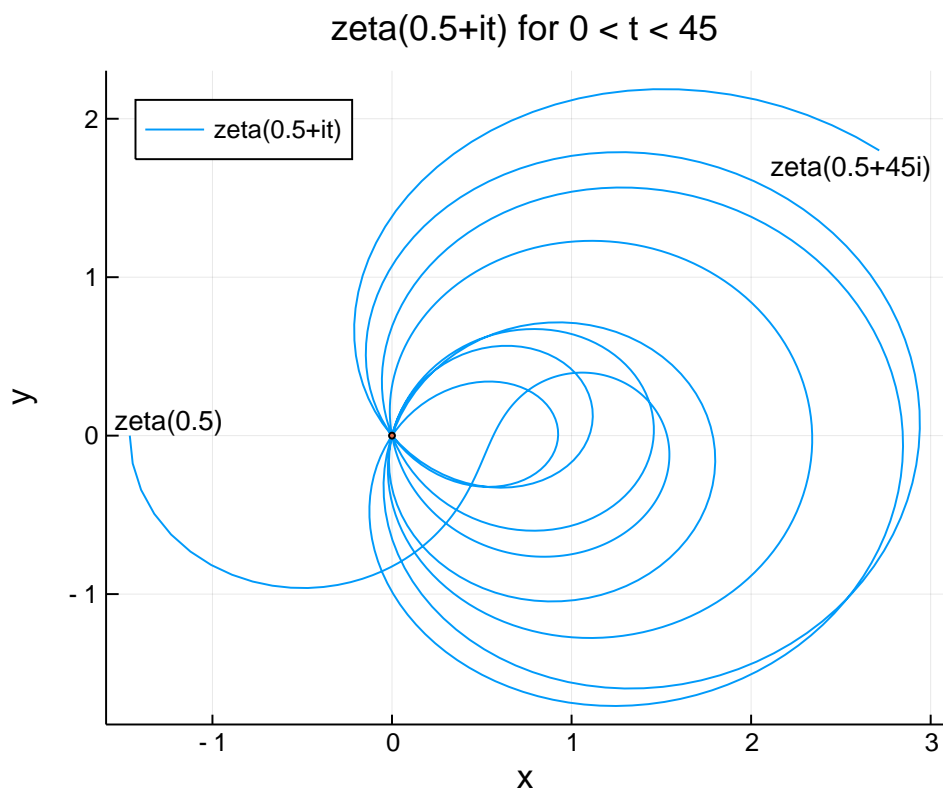
```
plot!(y, f.(s), label="")
xlabel!("y")
```



2.3 Riemann のゼータ関数の $\text{Re } s = 1/2$ 上での複素数値

直線 $\text{Re } s = 1/2$ での $\zeta(s)$ の値は何度も繰り返し複素平面の原点 0 を通る.

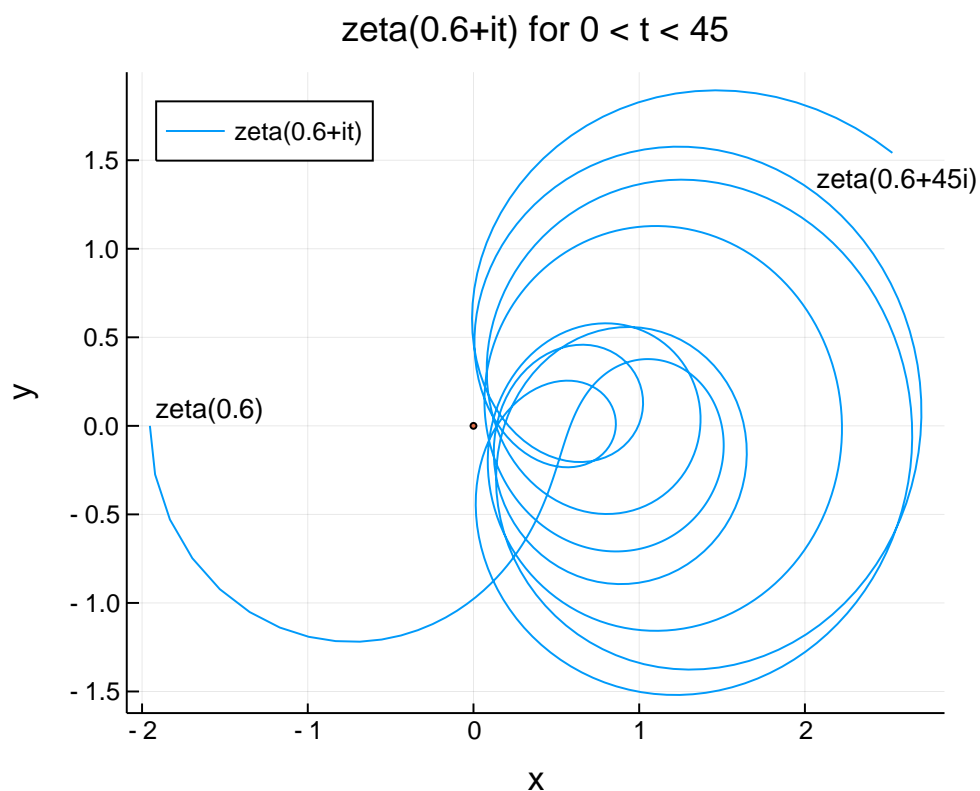
```
x = 1/2
y = range(0, 45, length=1000)
s = @. x + im*y
w = zeta.(s)
plot(size=(500,400), legend=:topleft)
title!("zeta(0.5+it) for 0 < t < 45", titlefontsize=12)
plot!(real(w), imag(w), label="zeta(0.5+it)")
scatter!([0], [0], markersize=2, label="")
xlabel!("x")
ylabel!("y")
annotate!([(-1.25, 0.1, "zeta(0.5)", 9)])
annotate!([(2.55, 1.7, "zeta(0.5+45i)", 9)])
```



2.4 Riemann のゼータ関数の $\operatorname{Re} s = 0.6$ 上での複素数値

直線 $\operatorname{Re} s = 0.6$ での $\zeta(s)$ の値を計算すると複素平面の原点を避けて通っていることがわかる。

```
x = 0.6
y = range(0, 45, length=1000)
s = @. x + im*y
w = zeta.(s)
plot(size=(500,400), legend=:topleft)
title!("zeta(0.6+it) for 0 < t < 45", titlefontsize=12)
plot!(real(w), imag(w), label="zeta(0.6+it)")
scatter!([0], [0], markersize=2, label="")
xlabel!("x")
ylabel!("y")
annotate!([(-1.6, 0.1, "zeta(0.6)", 9)])
annotate!([(2.55, 1.4, "zeta(0.6+45i)", 9)])
```



3 手書きのノート

3.1 ガンマ函数とベータ函数入門 (1)

(仮)定義 $\Gamma(s) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{s-1} dx \quad (s>0)$, $B(p, q) = \int_0^1 x^{p-1} (1-x)^{q-1} dx \quad (p, q>0)$,
ガンマ ベータ

ベータ函数の色々な表示

(1) $B(p, q) = \int_0^1 x^{p-1} (1-x)^{q-1} dx = \int_0^{\infty} \frac{t^{p-1} dt}{(1+t)^{p+q}} = \frac{1}{p} \int_0^{\infty} \frac{du}{(1+u^{1/p})^{p+q}}$
仮の定義 $x = \frac{t}{1+t} \Rightarrow 1-x = \frac{1}{1+t}$ $t = u^{1/p} \left(\frac{dt}{t} = \frac{1}{p} \frac{du}{u} \right)$ ベータ函数のこれらの表示はどれもよく出て来る。

(2) $B(p, q) = \int_0^1 x^{p-1} (1-x)^{q-1} dx = 2 \int_0^{\pi/2} (\cos \theta)^{2p-1} (\sin \theta)^{2q-1} d\theta$
 $x = \cos^2 \theta$ $y = z-x$ (x, z) は $0 < x < z < \infty$ を動く

(3) $\Gamma(p)\Gamma(q) = \int_0^{\infty} \left(\int_0^{\infty} e^{-(x+y)} x^{p-1} y^{q-1} dy \right) dx = \int_0^{\infty} \left(\int_x^{\infty} e^{-z} x^{p-1} (z-x)^{q-1} dz \right) dx$
 $z = x+y$ $z = xt$
 $= \int_0^{\infty} \left(\int_0^1 e^{-z} x^{p-1} (z-x)^{q-1} dx \right) dz = \int_0^{\infty} \left(\int_0^1 e^{-z} z^{p-1} t^{p-1} z^{q-1} (1-t)^{q-1} z dt \right) dz$
積分順序の交換

$= \int_0^{\infty} e^{-z} z^{p+q-1} dz \cdot \int_0^1 t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt = \Gamma(p+q) B(p, q)$
 $\therefore B(p, q) = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)}$ ← $B(p, q) = \frac{(p-1)!(q-1)!}{(p+q-1)!} \quad (p, q \in \mathbb{Z}_{\geq 1})$

性質

(4) $\Gamma(1) = \int_0^{\infty} e^{-x} dx = 1$, (5) $\Gamma(\frac{1}{2})^2 = \frac{\Gamma(\frac{1}{2})\Gamma(\frac{1}{2})}{\Gamma(1)} = B(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) = 2 \int_0^{\pi/2} d\theta = \pi$, $\therefore \Gamma(\frac{1}{2}) = \sqrt{\pi}$, ←

(6) $\Gamma(s+1) = \int_0^{\infty} (-e^{-x})' x^s dx = \int_0^{\infty} e^{-x} (x^s)' dx = s \int_0^{\infty} e^{-x} x^{s-1} dx = s \Gamma(s)$, $s! = \Gamma(s+1)$ と書く
部分積分 $(-\frac{1}{x})' = \Gamma(\frac{1}{2}) = \sqrt{\pi}$

(7) $n=0, 1, 2, \dots$ に對して, $\Gamma(n+1) = n \Gamma(n) = n(n-1) \Gamma(n-1) = \dots = n(n-1) \dots 2 \cdot 1 \cdot \Gamma(1) = n!$

(8) $\Gamma(n+\frac{1}{2}) = (n-1+\frac{1}{2}) \Gamma(n-1+\frac{1}{2}) = (n-1+\frac{1}{2})(n-2+\frac{1}{2}) \Gamma(n-2+\frac{1}{2}) = \dots = (n-1+\frac{1}{2}) \dots (1+\frac{1}{2}) \frac{1}{2} \Gamma(\frac{1}{2})$
 $= \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{2} \dots \frac{2n-1}{2} \sqrt{\pi} = \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{2^n} \sqrt{\pi} = \frac{2 \cdot 4 \dots (2n)}{2^n n!} \sqrt{\pi} = \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{2^n} \sqrt{\pi} = \frac{(2n)!}{2^{2n} n!} \sqrt{\pi}$

(9) $\int_0^{\pi/2} (\sin \theta)^{2n+1} d\theta = \frac{1}{2} B(\frac{1}{2}, n+1) = \frac{1}{2} \frac{\Gamma(\frac{1}{2}) \Gamma(n+1)}{\Gamma(n+\frac{1}{2})} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\pi} n!}{\frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{2^n} \sqrt{\pi}} = \frac{2 \cdot 4 \dots (2n)}{1 \cdot 3 \dots (2n-1)(2n+1)}$
 $\int_0^{\pi/2} (\sin \theta)^{2n} d\theta = \frac{1}{2} B(\frac{1}{2}, n+\frac{1}{2}) = \frac{1}{2} \frac{\Gamma(\frac{1}{2}) \Gamma(n+\frac{1}{2})}{\Gamma(n+1)} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\pi} \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{2^n} \sqrt{\pi}}{n!} = \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{2 \cdot 4 \dots (2n)} \frac{\pi}{2}$

(10) $\Gamma(s)\Gamma(1-s) = B(s, 1-s) = \int_0^{\infty} \frac{t^{s-1} dt}{1+t} = \frac{1}{s} \int_0^{\infty} \frac{du}{1+u^{1/s}} = \frac{1}{s} \frac{\pi s}{\sin(\pi s)} = \frac{\pi}{\sin(\pi s)}$
 $0 < s < 1$ $x = \sqrt[y]{t}$ 複素解析 $\int_0^{\infty} \frac{du}{1+u^a} \quad (a>1)$ の形の積分も本質的にベータ函数。

(11) $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} dx = 2 \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx = 2 \int_0^{\infty} e^{-y} y^{-\frac{1}{2}} dy = \Gamma(\frac{1}{2}) = \sqrt{\pi}$, ← Gauss 積分は $\Gamma(\frac{1}{2})$ に等しい。
この役に立つ。

(12) $\Gamma(s) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{s-1} dx = 2 \int_0^{\infty} e^{-y^2} y^{2s-1} dy$ ← Γ 函数は Gauss 積分の一般化。

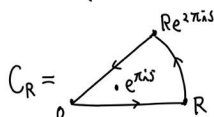
3.2 ガンマ関数とベータ関数入門 (2)

$$\begin{aligned} B(p, q) &= \int_0^1 x^{p-1} (1-x)^{q-1} dx \quad (p, q > 0 \text{ に対するベータ関数の定義}) \\ &= \int_0^\infty \frac{t^{p-1} dt}{(1+t)^{p+q}} \quad \left(x = \frac{t}{1+t} = 1 - \frac{1}{1+t}, \quad dx = \frac{dt}{(1+t)^2}\right) \\ &= \frac{1}{\Gamma} \int_0^\infty \frac{du}{(1+u^{1/\Gamma})^{p+q}} \quad \left(t = u^{1/\Gamma}, \quad \frac{dt}{t} = \frac{1}{\Gamma} \frac{du}{u}\right) \end{aligned}$$

$$B(p, q) = \frac{\Gamma(p) \Gamma(q)}{\Gamma(p+q)} \quad (\text{よく知られた公式})$$

以上により, 特に $0 < s < 1$ のとき,

$$\Gamma(s) \Gamma(1-s) = B(s, 1-s) = \frac{1}{s} \int_0^\infty \frac{du}{1+u^{1/s}}.$$



とあり, $\frac{1}{1+z^{1/s}}$ の $z = e^{\pi i s}$ の留数は $-s e^{\pi i s}$ である

$$\begin{aligned} z &= e^{\pi i s} + w \quad \text{とあり} \\ \frac{1}{1+z^{1/s}} &= \frac{1}{1+(e^{\pi i s} + w)^{1/s}} \\ &= \frac{1}{1+(e^{\pi i s \frac{1}{s}} + \frac{1}{s} e^{\pi i s (\frac{1}{s}-1)} w + O(w^2))} \\ &= \frac{-s e^{\pi i s}}{w} + O(1) \end{aligned}$$

$$-2\pi i s e^{\pi i s} = \int_{C_R} \frac{dz}{1+z^{1/s}} = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} \frac{dz}{1+z^{1/s}} = \int_0^\infty \frac{du}{1+u^{1/s}} - e^{2\pi i s} \int_0^\infty \frac{du}{1+u^{1/s}},$$

$$\therefore \int_0^\infty \frac{du}{1+u^{1/s}} = \frac{-2\pi i s e^{\pi i s}}{1 - e^{2\pi i s}} = \frac{2\pi i s}{e^{\pi i s} - e^{-\pi i s}} = \frac{\pi s}{\sin(\pi s)}.$$

$$\therefore \Gamma(s) \Gamma(1-s) = \frac{1}{s} \int_0^\infty \frac{du}{1+u^{1/s}} = \frac{\pi}{\sin(\pi s)}.$$

一方, $\Gamma(s)$ の定義

$$\Gamma(s) = \int_0^\infty x^{s-1} e^{-x} dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^n x^{s-1} \left(1 - \frac{x}{n}\right)^n dx = \lim_{n \rightarrow \infty} n^s \int_0^1 y^{s-1} (1-y)^n dy$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} n^s B(s, n+1) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^s \Gamma(s) n!}{\Gamma(s+n+1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^s n!}{s(s+1) \cdots (s+n)}.$$

$$B(p, q) = \frac{\Gamma(p) \Gamma(q)}{\Gamma(p+q)}, \quad \Gamma(n+1) = n! \quad \Gamma(s+n+1) = (s+n) \Gamma(s+n) = \cdots = (s+n) \cdots (s+1) s \Gamma(s)$$

ゆえに,

$$\frac{\sin(\pi s)}{\pi s} = \frac{1}{s \Gamma(s) \Gamma(1-s)} = \frac{1}{\Gamma(1+s) \Gamma(1-s)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(1+s)(2+s) \cdots (n+s)}{n^{1+s} n!} \frac{(1-s)(2-s) \cdots (n-s)}{n^{1-s} n!}$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n+1}{n}\right)^2 \frac{(1+s)(2+s) \cdots (n+s)}{(n+1)!} \frac{(1-s)(2-s) \cdots (n-s)}{(n+1)!} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n+1}{n}\right)^2 \left(1+\frac{s}{1}\right) \left(1+\frac{s}{2}\right) \cdots \left(1-\frac{s}{n+1}\right) \left(1-\frac{s}{2}\right) \cdots \left(1-\frac{s}{n+1}\right)$$

$$= \prod_{k=1}^\infty \left(1 + \frac{s}{k}\right) \left(1 - \frac{s}{k}\right) = \prod_{k=1}^\infty \left(1 - \frac{s^2}{k^2}\right), \quad \therefore \sin(\pi s) = \pi s \prod_{k=1}^\infty \left(1 - \frac{s^2}{k^2}\right)$$

3.3 Hurwitz のゼータ函数とガンマ函数の関係

$$\begin{cases} \zeta(s, x) := \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(x+k)^s} \quad (s>1, x \in \mathbb{Z}_{>0}) \quad \text{--- Hurwitz のゼータ函数.} \\ \zeta(s, x+1) = \zeta(s, x) - \frac{1}{x^s}, \quad \therefore \zeta_s(s, x+1) = \zeta_s(s, x) + x^{-s} \log x, \quad \leftarrow (1) \\ \zeta_x(s, x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{-s}{(x+k)^{s+1}} = -s \zeta(s+1, x), \quad \therefore \zeta_{xx}(s, x) = s(s+1) \zeta(s+2, x), \quad \leftarrow (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Gamma(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^x n!}{x(x+1) \cdots (x+n)} \quad (\text{容易に示せる有名な公式}) \\ \Psi(x) := \frac{d}{dx} \log \Gamma(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{d}{dx} \log \frac{n^x n!}{x(x+1) \cdots (x+n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\log n - \sum_{k=0}^n \frac{1}{x+k} \right) \\ \Psi'(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n \frac{1}{(x+k)^2} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(x+k)^2} = \zeta(2, x) \quad \leftarrow (3) \end{cases}$$

$$\zeta_{s,xx}(0, x) \stackrel{(3)}{=} \zeta(2, x) \stackrel{(3)}{=} \Psi'(x) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \log \Gamma(x), \quad \leftarrow (4)$$

$$F(x) := \zeta_s(0, x) - \log \Gamma(x) \text{ とおく, このとき, } F''(x) \stackrel{(4)}{=} 0 \text{ の } x'', \quad F(x) = a + bx,$$

$$F(x+1) = \zeta_s(0, x+1) - \log \Gamma(x+1) \stackrel{(1)}{=} \zeta_s(0, x) + \log x - \log \Gamma(x) = \zeta_s(0, x) - \log \Gamma(x) = F(x), \quad \therefore F(x) = a$$

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\frac{1}{2}-1} dx = \int_0^{\infty} e^{-y^2} dy = \sqrt{\pi} \quad (\text{Gauss の積分}) \quad \leftarrow (5) \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \zeta(s)$$

$$\zeta\left(s, \frac{1}{2}\right) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{1}{2}+k\right)^s} = 2^s \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^s} = 2^s \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)^s} \right) = (2^s - 1) \zeta(s), \quad \zeta(0) = -\frac{1}{2}$$

$$\therefore \zeta_s\left(s, \frac{1}{2}\right) = 2^s \zeta(s) \log 2 + (2^s - 1) \zeta'(s), \quad \therefore \zeta_s\left(0, \frac{1}{2}\right) = \zeta(0) \log 2 = -\frac{1}{2} \log 2 = -\log \sqrt{2} \quad \leftarrow (6)$$

$$F\left(\frac{1}{2}\right) = \zeta_s\left(0, \frac{1}{2}\right) - \log \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \stackrel{(5)}{=} -\log \sqrt{2} - \log \sqrt{\pi} = -\log \sqrt{2\pi}, \quad \therefore F(x) = -\log \sqrt{2\pi},$$

$$\text{したがって, } \zeta_s(0, x) = \log \Gamma(x) - \log \sqrt{2\pi} = \log \frac{\Gamma(x)}{\sqrt{2\pi}}, \quad \therefore \log \Gamma(x) = \zeta_s(0, x) + \log \sqrt{2\pi},$$

$$\begin{aligned} \zeta(s, x+1) &\stackrel{s>1}{=} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(x+1+k)^s} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{\infty} e^{-(x+1+k)t} t^{s-1} dt = \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{\infty} \frac{e^{-(x+1)t} t^{s-1} dt}{1 - e^{-t}} \\ &= \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{\infty} \frac{e^{-xt} t^{s-1} dt}{e^t - 1} = \frac{1}{\Gamma(s)} \left(\int_0^{\infty} \left(\frac{1}{e^t - 1} - \frac{1}{t} + \frac{1}{2} \right) e^{-xt} t^{s-1} dt + \int_0^{\infty} e^{-xt} t^{s-2} dt - \frac{1}{2} \int_0^{\infty} e^{-xt} t^{s-1} dt \right) \\ &= \frac{1}{\Gamma(s)} \left(\int_0^{\infty} \left(\frac{1}{e^t - 1} - \frac{1}{t} + \frac{1}{2} \right) e^{-xt} t^{s-1} dt + \frac{\Gamma(s-1)}{x^{s-1}} - \frac{\Gamma(s)}{2x^s} \right) = \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{e^t - 1} - \frac{1}{t} + \frac{1}{2} \right) e^{-xt} t^{s-1} dt + \frac{1}{(s-1)x^{s-1}} - \frac{1}{2x^s}, \end{aligned}$$

$$\begin{cases} F(0, x) = 0 \neq 1, \quad F_s(0, x) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{F(s, x)}{s} = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{e^t - 1} - \frac{1}{t} + \frac{1}{2} \right) e^{-xt} \frac{dt}{t}, \quad =: F(s, x) \\ \frac{\partial}{\partial s} \Big|_{s=0} \frac{1}{(s-1)x^{s-1}} = x \log x - x, \quad \frac{\partial}{\partial s} \Big|_{s=0} \left(-\frac{1}{2x^s} \right) = \frac{1}{2} \log x, \end{cases}$$

$$\therefore \log \Gamma(x+1) = \zeta_s(0, x+1) + \log \sqrt{2\pi} = x \log x - x + \frac{1}{2} \log x + \log \sqrt{2\pi} + \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{e^t - 1} - \frac{1}{t} + \frac{1}{2} \right) e^{-xt} \frac{dt}{t},$$

Binet の公式