

# 円周率

Tam

# 円周率とは？

円周の長さ / 円の直径 = 円周率

としています.

円周率 $\pi$ の語源はギリシャ語の「周り」を意味する「περιφέρεια」の頭文字と思われるとのこと。

## 覚え方（英語圏）

Yes, I have a number.

# 数学の日

今日3月14日は「数学の日」とのことですが、  
これは、アインシュタインの誕生日が3月14日であることと、  
円周率の近似値から  
公益財団法人・日本数学検定協会が1997年（平成9年）に制定しました。

# 円周率の日

1. 3月14日

円周率の近似値より

2. 7月22日

$22/7 = 3.14\dots$

3. 12月21日

12月21日が1月1日から数えて 355日目であり、

$355/113 = 3.14159292\dots$

# どうやって求めるの？

## 計測

古代エジプトなどでは実際に長さを測って近似値を求めています.

当時は近似値なのか正しい値なのかも分からず.

## 正多角形（アルキメデス）

アルキメデス（紀元前287～212年）が正96角形

$$3\frac{10}{71} < \pi < 3\frac{1}{7}$$

$$3.14084507 < \pi < 3.142857142$$

## 正多角形 (Zu Chongzi)

紀元後429～500年に中国の数学者Zu Chongziが

$$\frac{355}{113} = 3.14159292\dots$$

ただし、求め方は現在不明。



## 正多角形（コーレン）

1600年にルドルフ・ファン・コーレンというドイツの数学者

正 $2^{62}$ 角形 = 約50京角形

小数点第35桁まで正しい値を求める。

## 確率論（ビュフォン）

フランスの数学者ビュフォンの「ビュフォンの実験」

平行な線に線の間隔の半分の長さの針を投げ、投げた回数を線に交わった回数で割ると円周率が求まる

1. 一定の間隔の平行線を何本か引く.
2. 平行線の間隔の半分の長さの針を用意する.
3. 平行線に向かって針を何回か投げる.
4. 「投げた回数」を「平行線に交わった回数」で割る.

円周率 = 投げた回数 / 針が平行線に交わった回数

## 確率論（モンテカルロ法）

1. 正方形と、それに内接する円を描く.
2. 正方形の内部のランダムな位置に点を何個か打つ.
3. 「円の内部の点の数」 / 「打った点の数」 =  $\pi/4$



# 円周率は本当に無限に続くの？

証明法：

$$\pi = \frac{q}{p}$$

として矛盾を導く.

1761年、ドイツの数学者ヨハン・ハインリッヒ・ランベルトによりほぼ証明される.

その後、フランスのアドリアン＝マリ・ルジャンドルが 1794年に厳密な証明を与え、円周率 $\pi$  は有限小数でも循環小数でもないことが分かった.

## 無限桁の数

$\sqrt{2}$  なんかも無限に続く.

ただし,  $\pi$  は代数的数 (多項式の解となる数) でもない.

このような数を「超越数」と呼んでいます.

# 超越数

$\pi$  だけではなく,  $e$  (ネイピア数) も超越数です.

$e$  と  $\pi$  は別々の定義から出てきた超越数ですが,  
オイラーの公式:

$$e^{\pi i} = -1$$

などで知られるように, とても関係の深い数です.

## $\pi$ の不思議

$\pi$ の性質はだいぶ分かってきているものの、  
未解決問題も多く、まだまだ謎に包まれています。

ex)  $\pi^\pi$ ,  $e + \pi$  は超越数なのか？（現在でもまだ分かってない。）など。

# 円周率の計算法

$\tan(\pi/4) = 1$  なので,

$$\tan^{-1}(1) = \frac{\pi}{4}$$

が求まります.

グレゴリ・ライプニッツ級数:

$$\tan^{-1}(x) = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5 - \frac{1}{7}x^7 + \frac{1}{9}x^9 - + \dots$$

より,

$$\tan^{-1}(1) = 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \frac{1}{9} - \frac{1}{11} + - \dots$$



## マチンの公式

$$\frac{\pi}{4} = 4\tan^{-1}\left(\frac{1}{5}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{239}\right)$$

$$\pi = A_1 \tan^{-1}(b_1) + A_2 \tan^{-1}(b_2)$$

となる公式は4つしか存在しないことが知られている.

マチンの公式はそのなかで最も収束（計算）が速い.

## マチンの公式の計算

シャンクスがこの公式を使用して1874年に707桁まで手計算で求める.

ファーガソンが1945年に527桁までしか正しくないことを発見する.

# ラマヌジャンとチュドノフスキーの公式

$$\frac{1}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{99^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(4n)!}{(n!)^4} \frac{26390n + 1103}{396^{4n}}$$

$$\frac{1}{\pi} = \frac{12}{\sqrt{C^3}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (6k)! (A + Bk)}{(3k)! (k!)^3 C^{3k}} = \frac{12}{\sqrt{C^3}} \sum_{k=0}^{\infty} P_k$$
$$\begin{cases} A = 13591409 \\ B = 545140134 \\ C = 640320 \end{cases}$$

計算機で計算するのにはとても適している

かつ、途中で計算が止まっても、途中から計算を再開できる！

→桁数が○兆桁に！

## ここまでは10進数

円周率は 10進数だけではありません.

2進数で小数を表記できるので, もちろん円周率も表現できます.

## 2進数用の公式

### BBP(Bailey-Borwein-Plouffe)の公式

$$\pi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{16^n} \left( \frac{4}{8n+1} - \frac{2}{8n+4} - \frac{1}{8n+5} - \frac{1}{8n+6} \right)$$

収束はそれほど速くありませんが、  
2進数での円周率の目的の桁を直接計算できる！

中国剰余定理で計算結果の検証ができる。

## Fabrice Bellardの公式

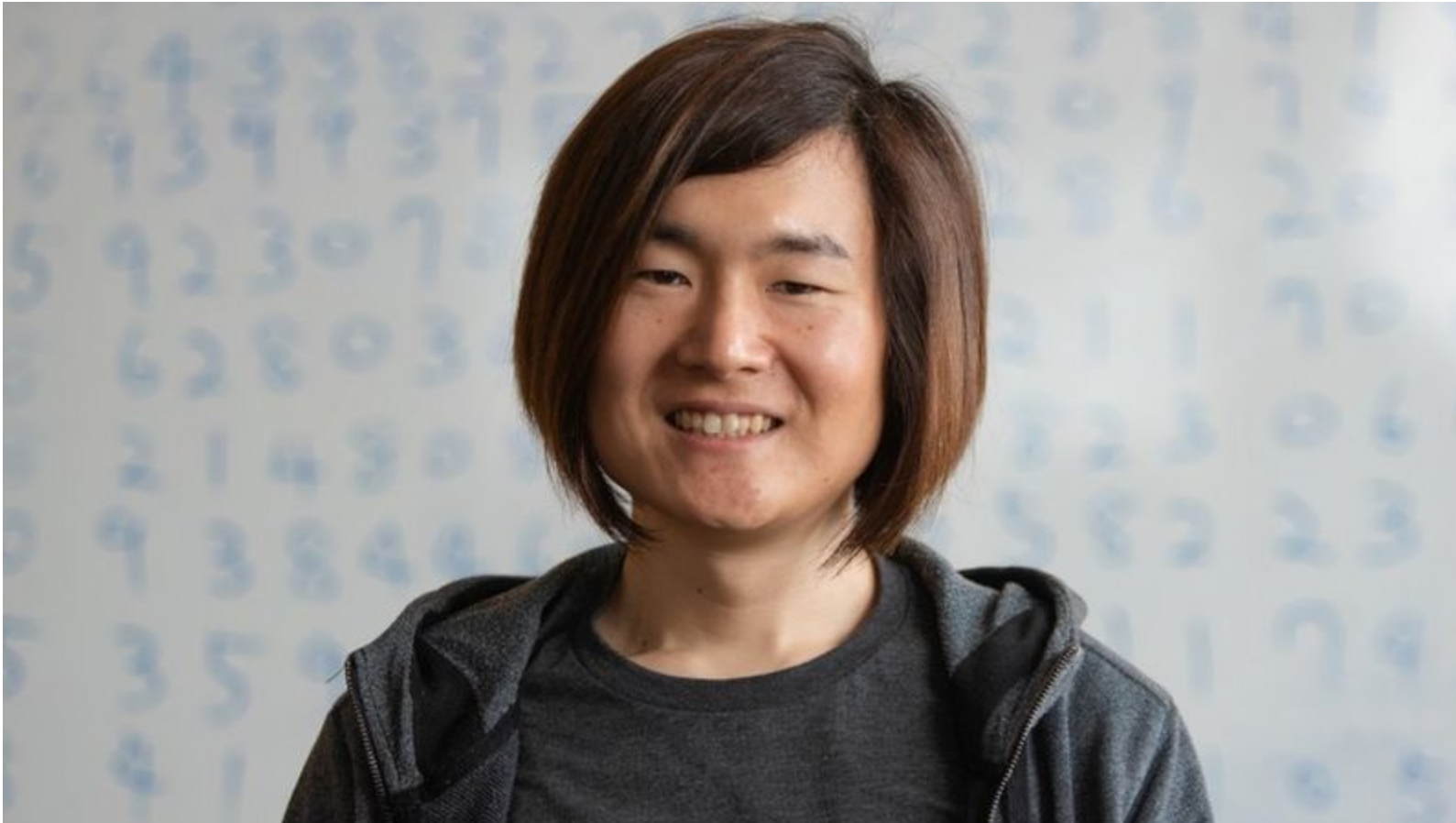
LZEXE や ffmpeg の原作者として知られているフランスの人が考案した公式。

実際に、作者自身によって 2009年12月31日までに Core i7 メモリ6GB を使って、それまでの世界記録（筑波大学のスーパーコンピューターを使った2兆5769億8037万桁）を更新し、2兆6999億9999万桁の計算を行った。

# 2019年3月14日

Googleでエンジニアとして働く岩尾エマはるかさんが、  
円周率を小数点以下約31兆4159億2653万5897桁まで計算。

GCP を利用。



## 円周率は 3.14... でいいのか？

一部の研究者により、現在の円周率  $\pi$  に代わるべき数学定数として  $\tau$  が提唱されている。

$$\tau = 2 \times \pi$$

メリット：三角関数の周期などと一致する。

ただし、現在の主要論文での  $\tau$  の採用事例はとても少ない。



## 円周率のこれから

計算速度競争も続いていますが、数学的な性質でも未解明な部分が多く、これからも謎の解明が待たれます。

ご清聴ありがとうございました。