現代科学「ミクロとマクロの物理学」

なぜ時間に向きがあるのだろう？

理学部物理学科　田崎晴明

覆水
盆に返らず

時間の向き

経験事実

我々は、時間には「過去から未来」へ向かう一方的な流れがあると感じる。

状態 A → 状態 B が可能でも、
状態 B → 状態 A は一般には可能でない

不可逆性 (irreversibility)

力学法則の可逆性

力学（Newton 力学、量子力学、・・）

もちろん「世界の完全な記述」ではないが、きわめて多様な現象を高精度で記述する理論体系

力学の法則では、時間に特別の向きはない（力学法則は可逆）

力学法則の可逆性

Newton 方程式 $m\dfrac{d^2\boldsymbol{r}(t)}{dt^2} = \boldsymbol{F}(t, \boldsymbol{r}(t))$

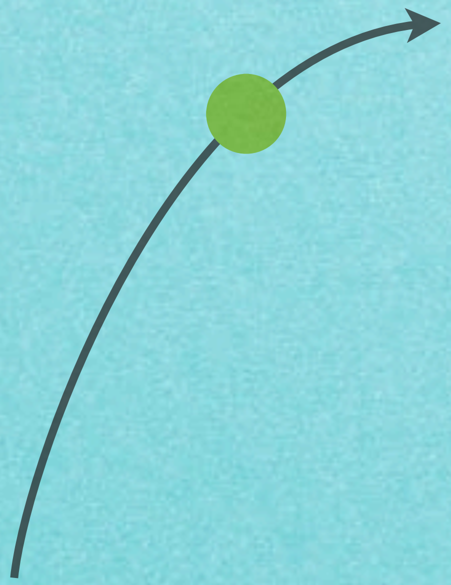
時間反転 $s = -t$ $\bar{\boldsymbol{r}}(s) = \boldsymbol{r}(-s)$

$$m\frac{d^2\bar{\boldsymbol{r}}(s)}{dt^2} = \boldsymbol{F}(s, \bar{\boldsymbol{r}}(s))$$

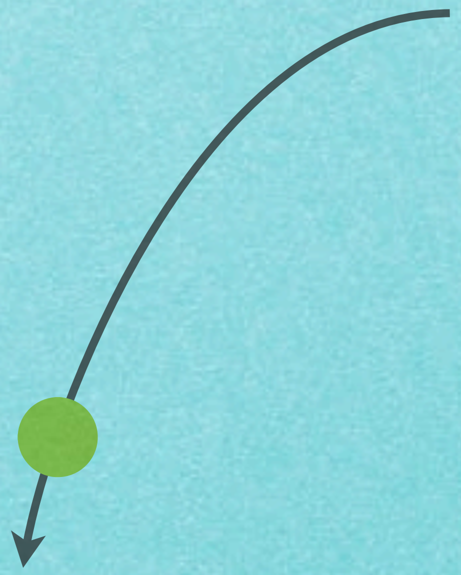
時間反転した軌道 $\bar{\boldsymbol{r}}(s)$ も、元の軌道 $\boldsymbol{r}(t)$ と全く同じ方程式を満たす

力学法則の可逆性

ある運動が可能なら、



それを「逆回し」
にした運動も可能



不可逆性の問題

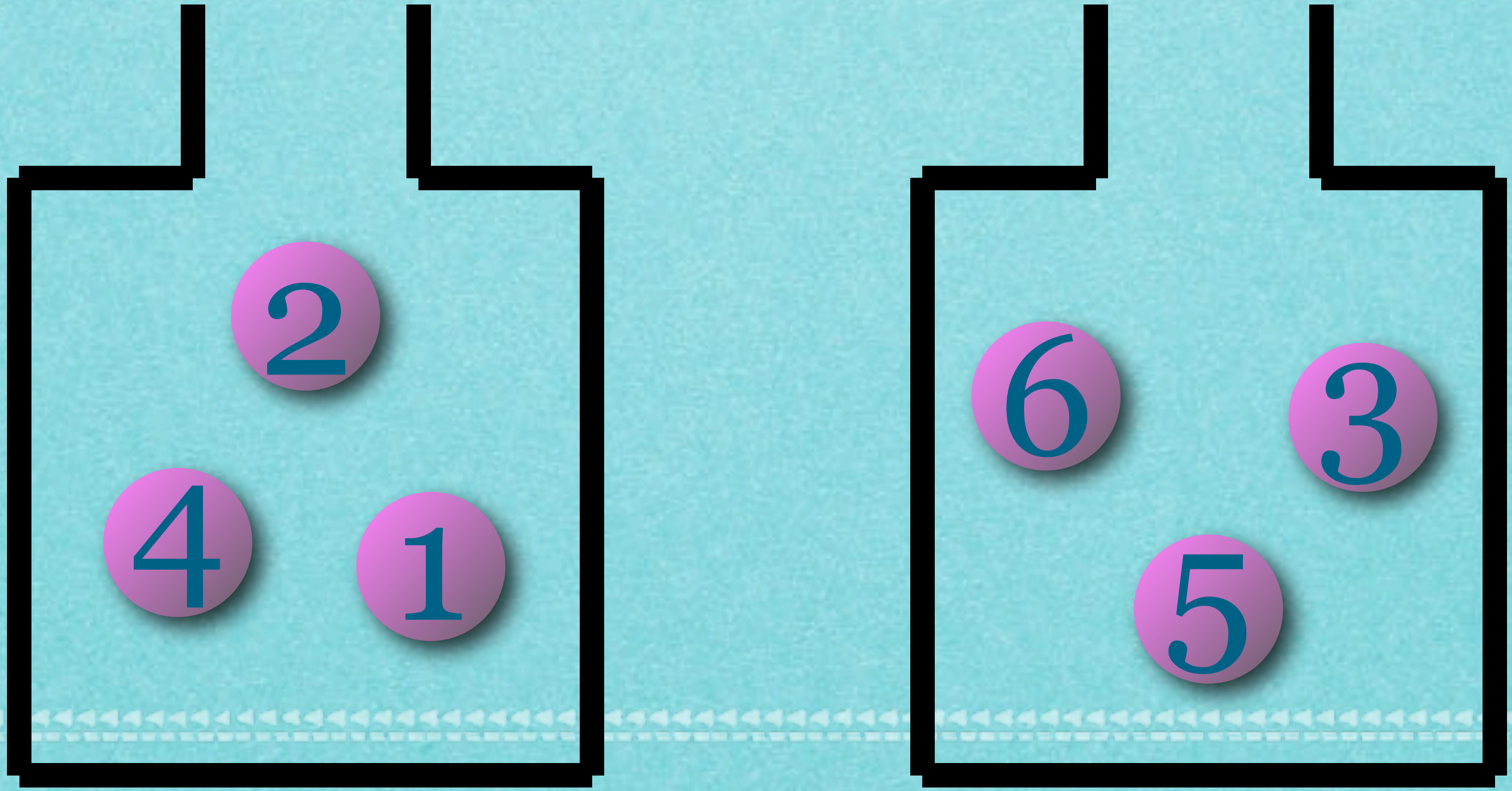
現実の世界には不可逆なふるまい（逆回しできない現象）が存在する

力学法則の可逆性と現実の世界で見られる不可逆性は矛盾しないのか？

可逆な力学法則から、不可逆なふるまいが生じうるのか？

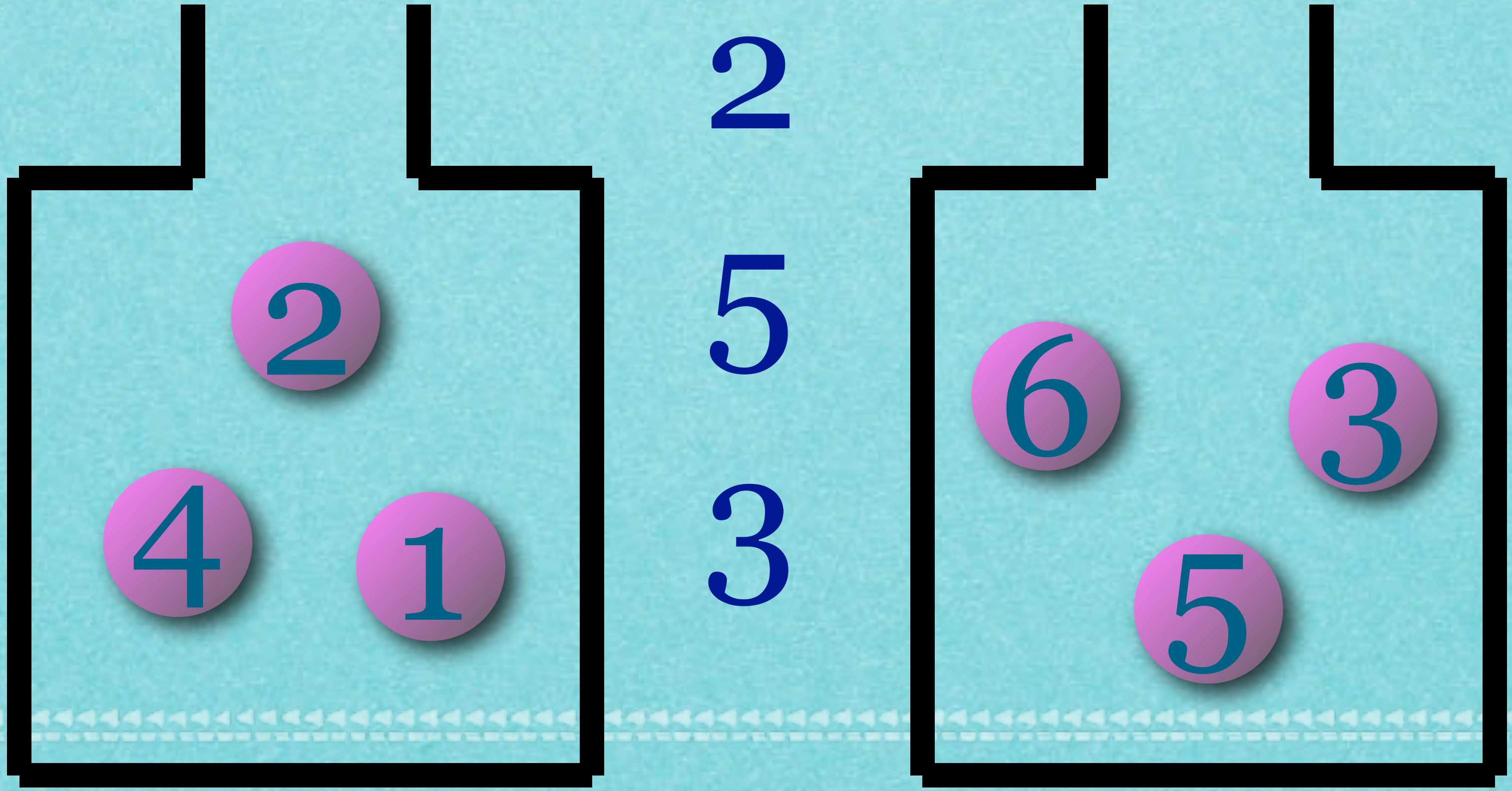
エーレンフェストの壷

1, 2, ..., N と番号を付けた球を、
二つの壷にいれる



エーレンフェストの壷

1, 2, ..., N の数をランダムに一つ選び、その番号の球を移動

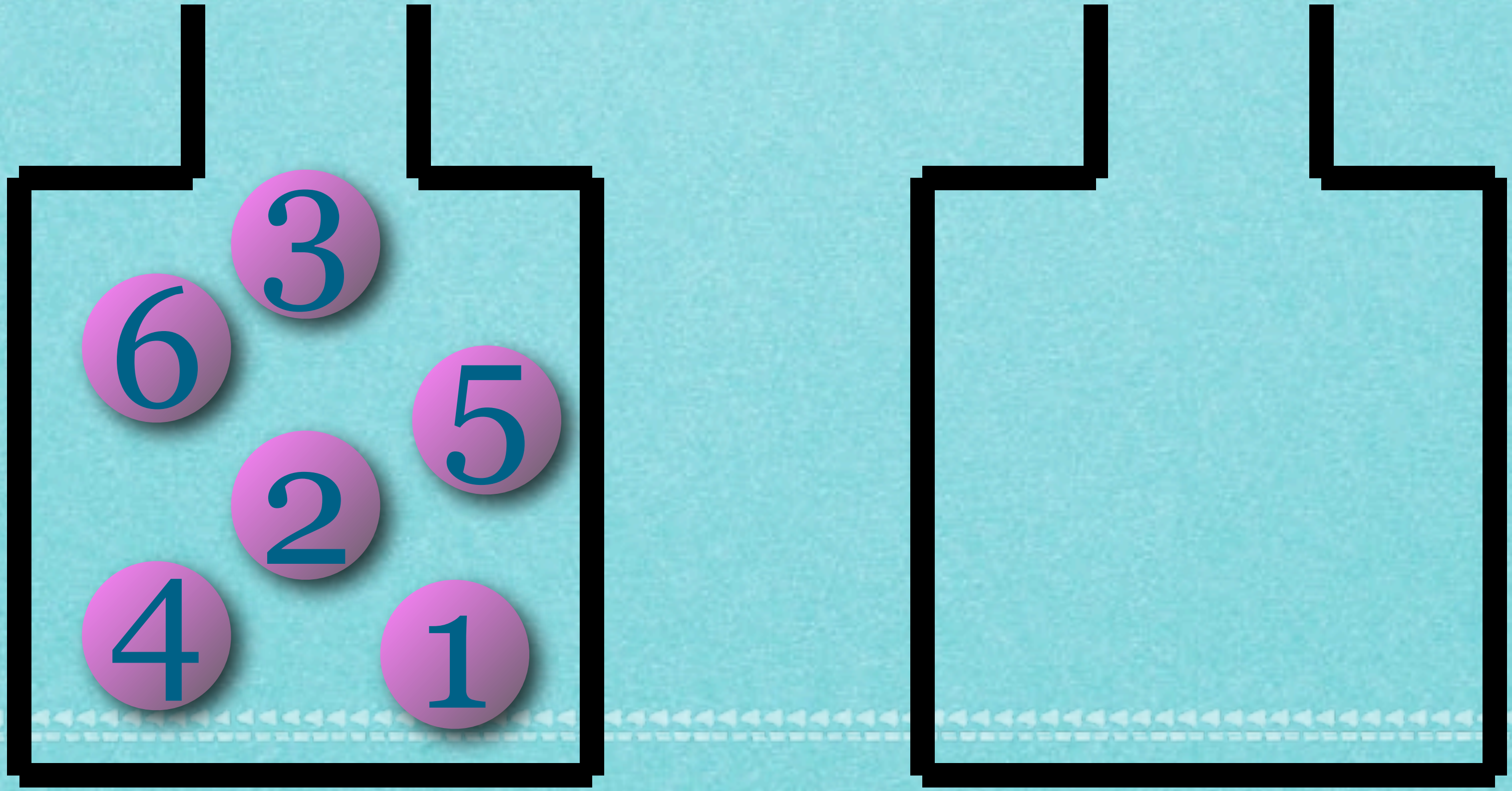


エーレンフェストの壷

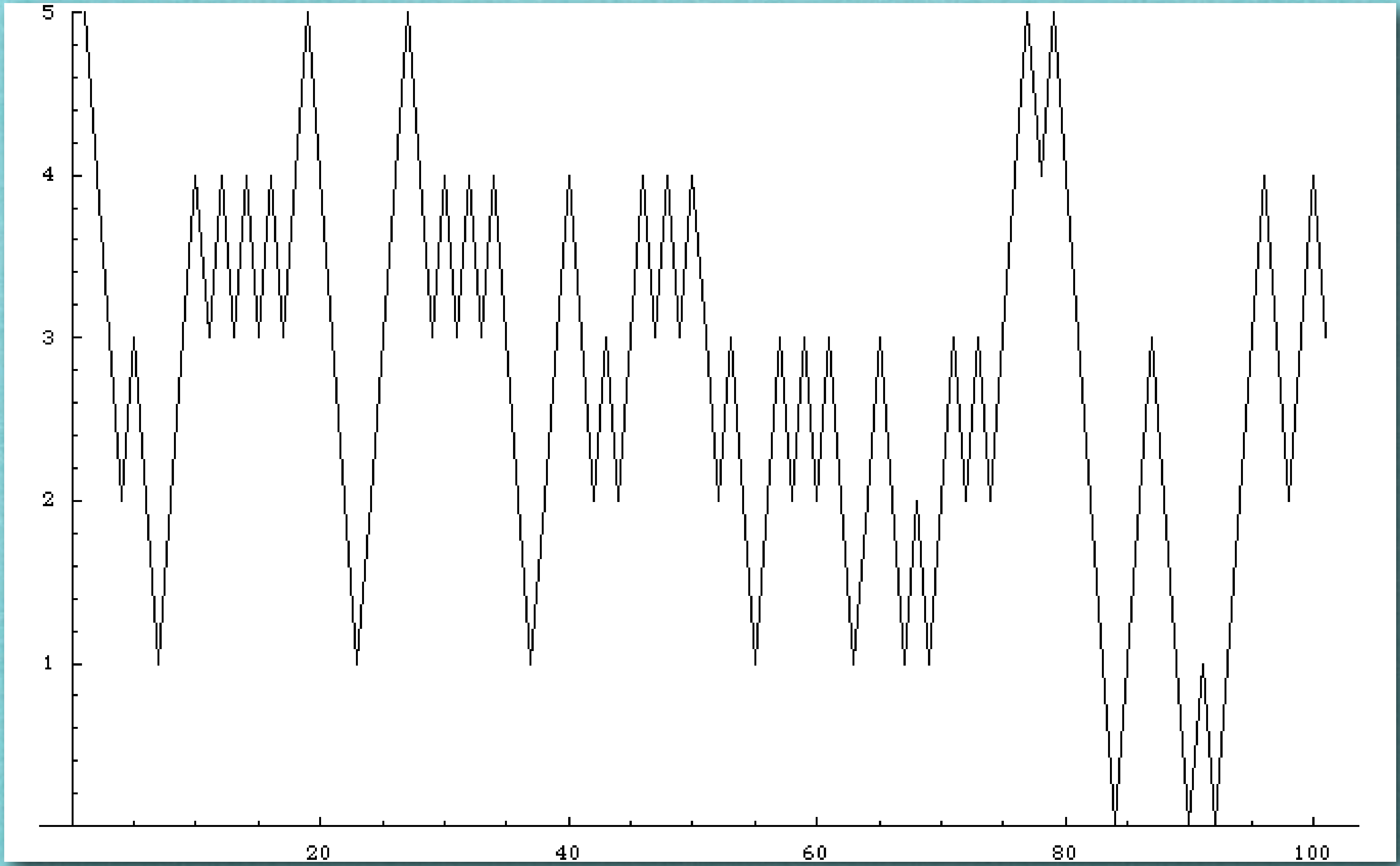
- 球を動かすルールは、時間の向きを変えても変わらない（可逆なルール）。
- 現実世界の不可逆性を理解する鍵になる

エーレンフェストの壷

すべてのボールが左側の壺に入っている
状況から出発して、個数の変化をみる



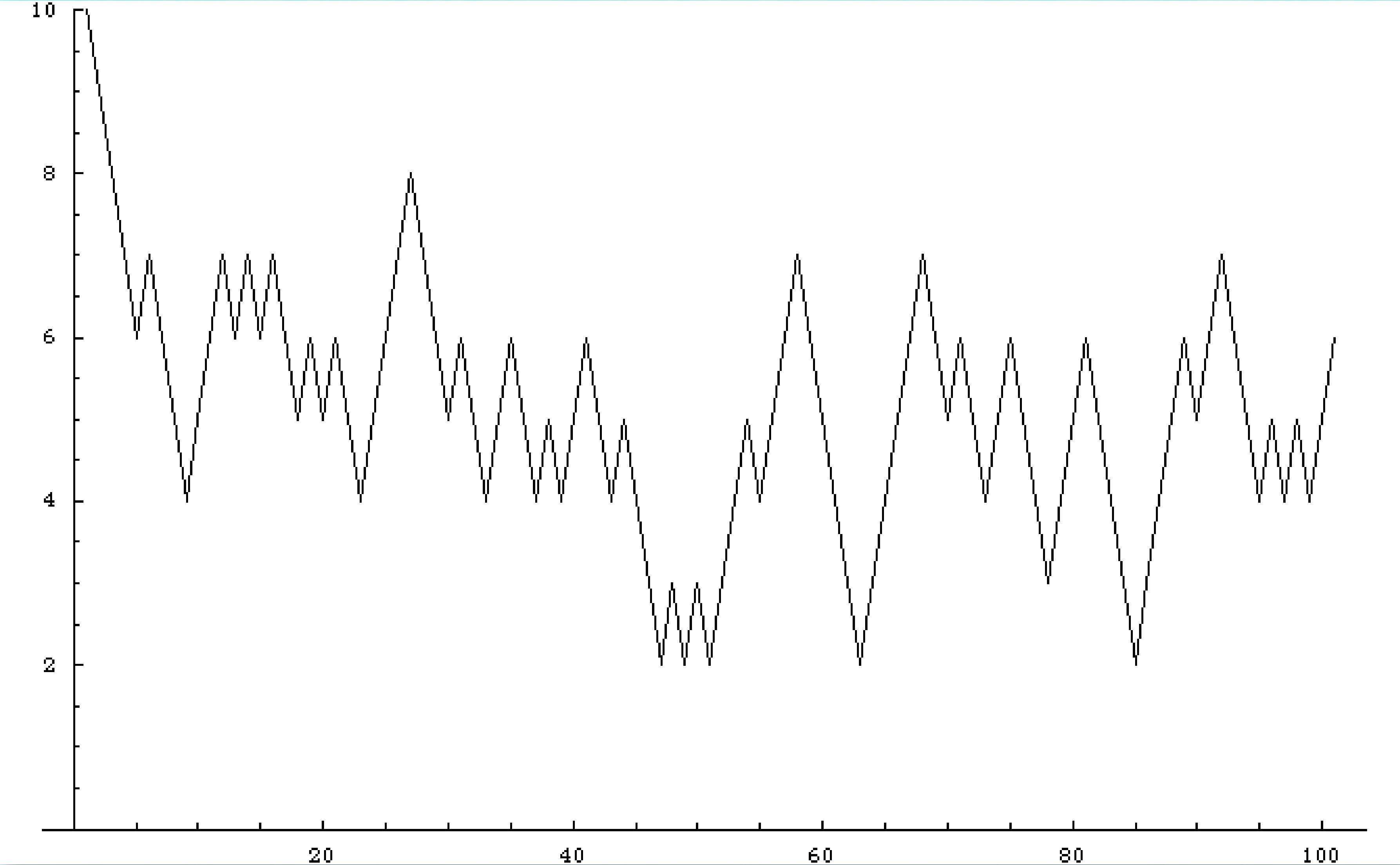
ボールの数　N = 5 のとき



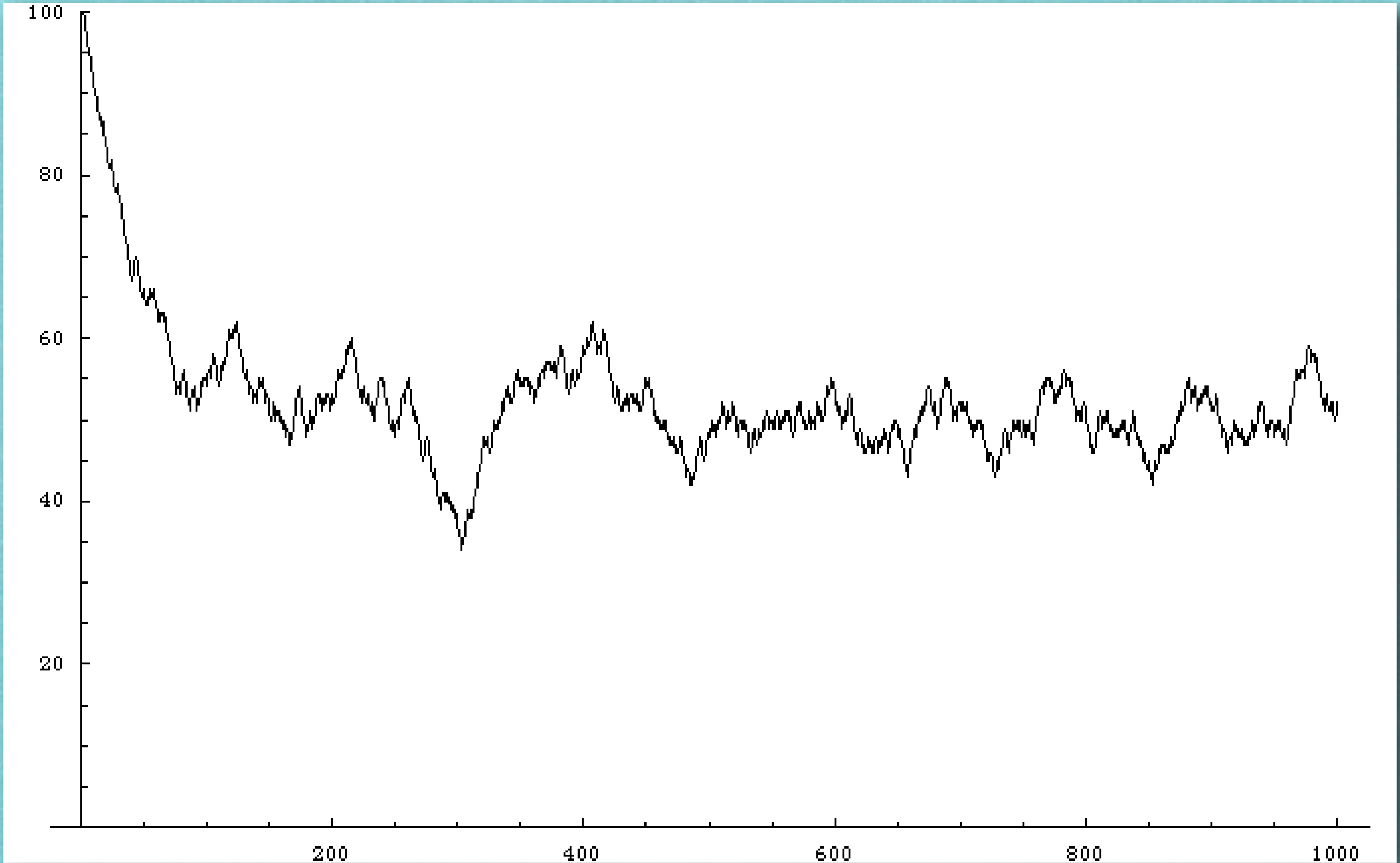
左の壺のボールの個数

時間（動かした回数）

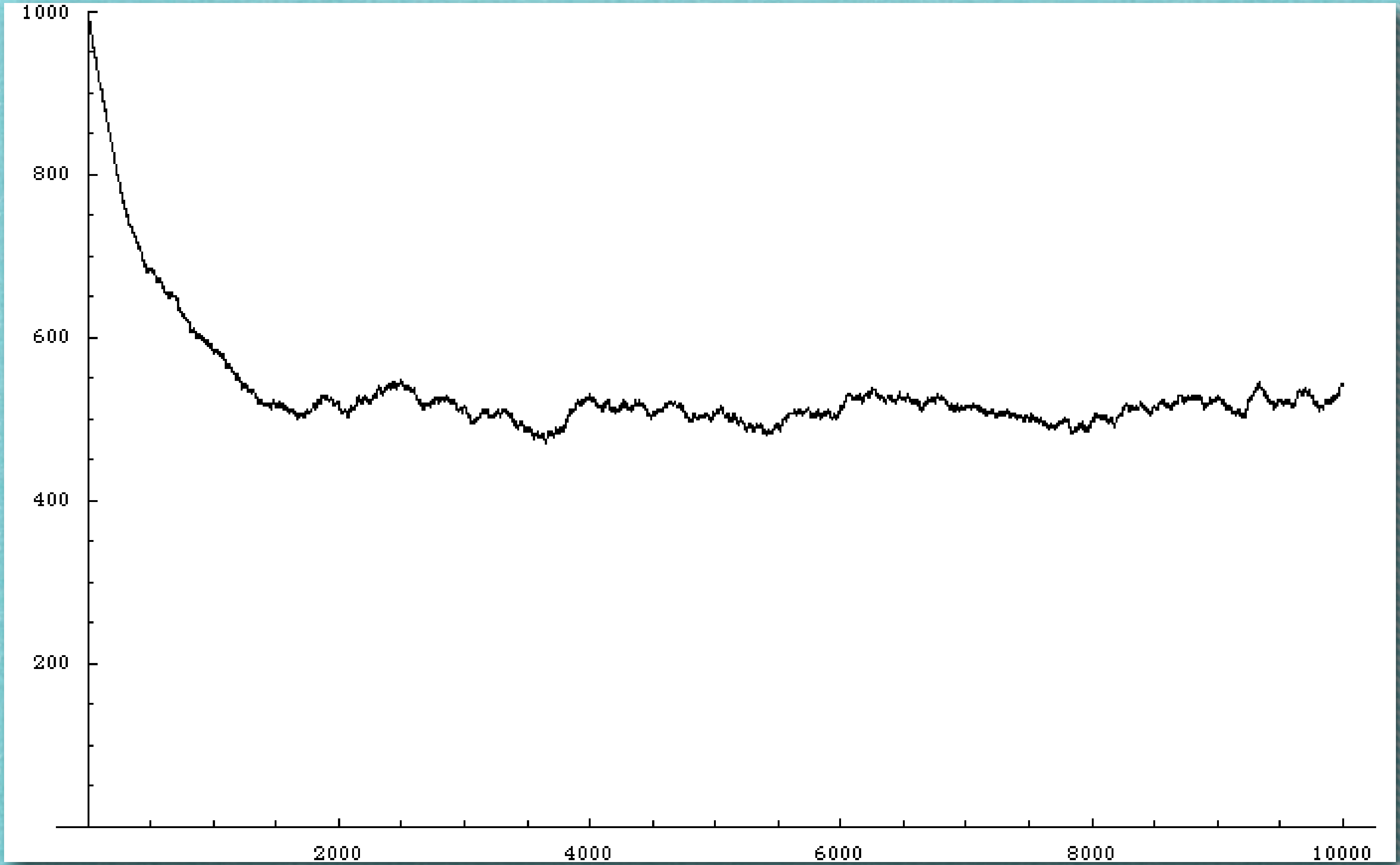
ボールの数　N = 10 のとき



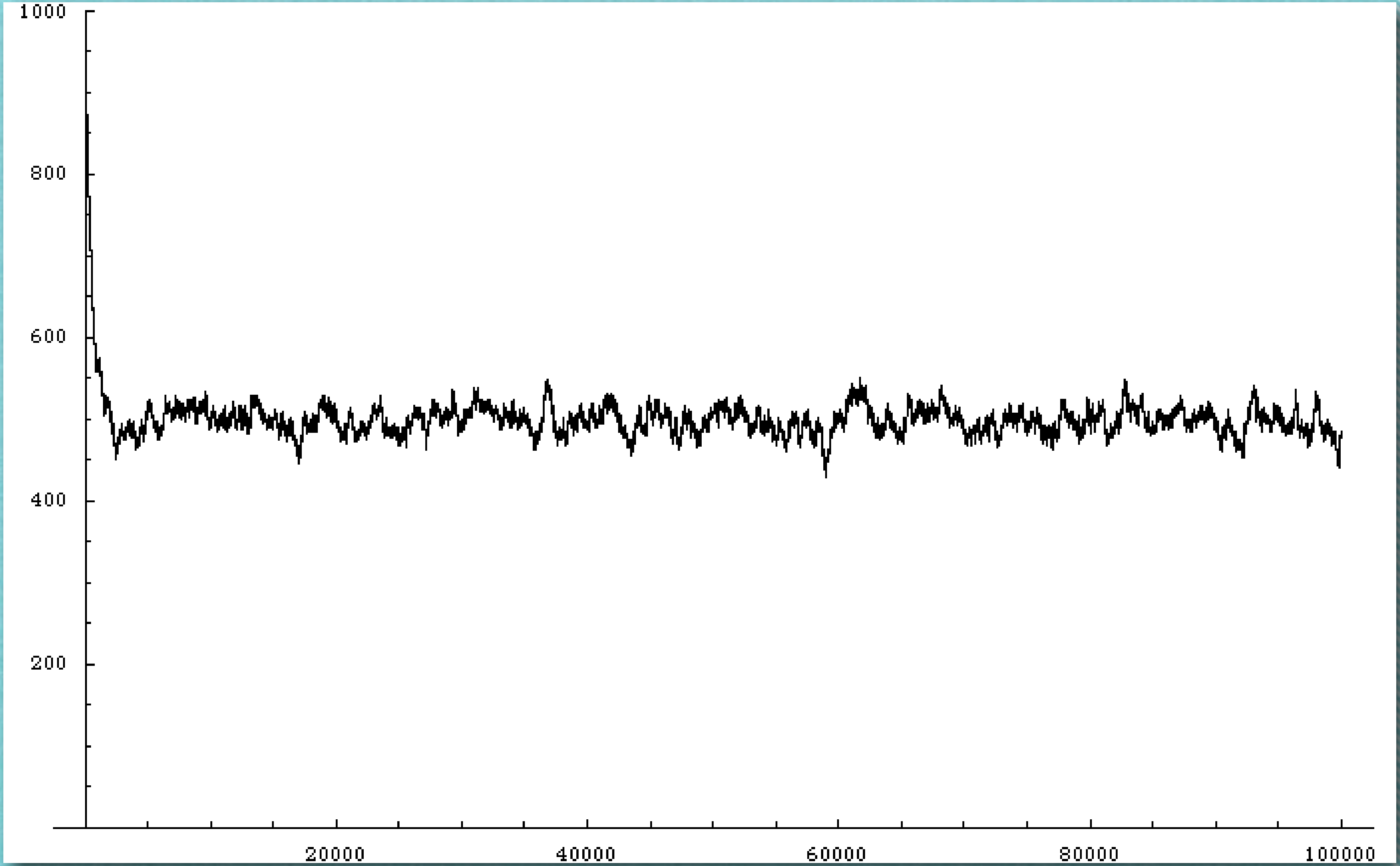
ボールの数　N = 100 のとき



ボールの数　N = 1000 のとき



ボールの数　N = 1000 のとき



不可逆性の出現？

- ボールの数 N が大きいとき、各々の壺のボールの数は N/2 に近づく
- 不可逆なふるまい（「時間の向き」が生まれた！？）
- しかし、基本のルールは可逆！

不可逆性の本質

偏った状態　（ほぼ）均等な状態

「偏った状態」から「均等な状態」に向かう一方的な流れがある

なぜ？？

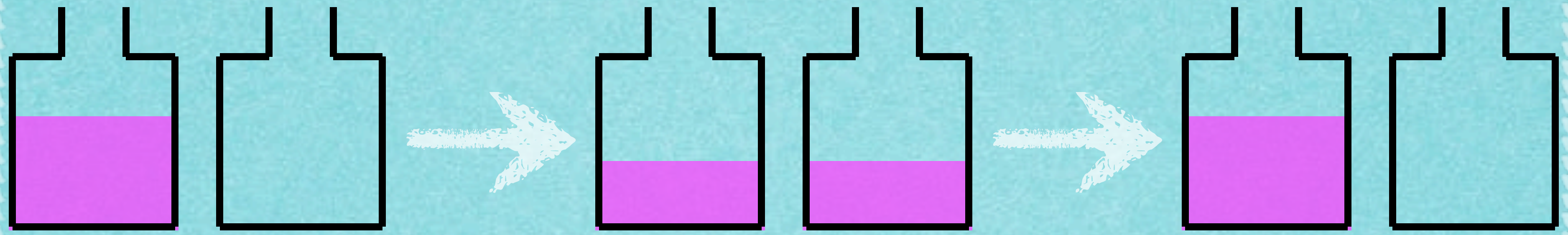
不可逆性の本質

偏った状態は
一通り

均等な状態には無数
の組み合わせがある

ごく少数の「偏った状態」から、膨大な
数の「均等な状態」へ自然に移っていく

再帰的なふるまい



きわめて長い時間の後には、再び、偏った状態に戻ることもある

再帰時間 $\simeq 2^N$

$N = 1000$ なら $2^N \sim 10^{301}$

1 秒間に 10^{12} 回動かしても 3×10^{281} 年！

（宇宙の年齢はたったの 137 億年）

不可逆性へのヒント

構成要素が多い系では

（少数の）偏った＝秩序だった状態

↓

（無数の）均等な＝無秩序な状態

という一方的な流れがある。

再帰時間は異常に長く、実質的に不可逆

時間の向き

状態 A → 状態 B が可能でも、

状態 B → 状態 A は一般には可能でない

不可逆性 (irreversibility)

状態 A：秩序をもった状態

状態 B：秩序のない状態

とすれば、不可逆性は自然に理解でき、

力学法則の可逆性とも矛盾しない

時間の向き

これによって、「時間の向き」をある程度は理解できる。

気体の混合、物の腐敗、覆水、忘却・・・

しかし、これでわれわれの感じる「時間の向き」を完全に理解できるのか？？

本質は未解決

熱力学的不可逆性

平衡状態 A から平衡状態 B への断熱操作が可能なための必要十分条件は $S(\mathrm{A}) \leq S(\mathrm{B})$

S 平衡状態のエントロピー

$S(\mathrm{A}) < S(\mathrm{B})$ なら、A から B には移せるが、B から A には移せない

不可逆性が定量的に厳密に理解できている例

レポート課題

- 本質的に不可逆な現象の例を自分なりに考えよ。
- エーレンフェストの壺の個数の変化を自分でプログラムして（あるいは、確率の時間発展を解析して）調べよ

- 本やネットで調べたことを単に丸写し・要約するのはレポートではない。それには、人の知的活動としてほとんど何の意味もない。

- 調べることも必要だが、調べた素材に新たなまとまりを与え、新たな光をあて、新たな意味をもたせなければ、あなたが関与する意味はまったくない。小学校時代の「調べ学習」で丸写しのレポートをほめてもらったことがあったとしても、そのことはもう忘れよう