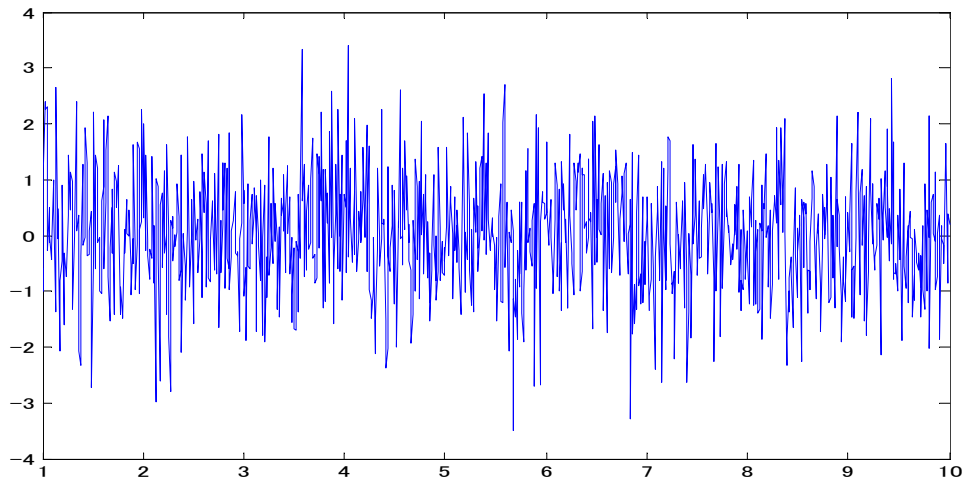


脳、リズム、揺らぎ

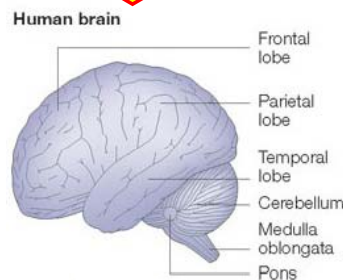
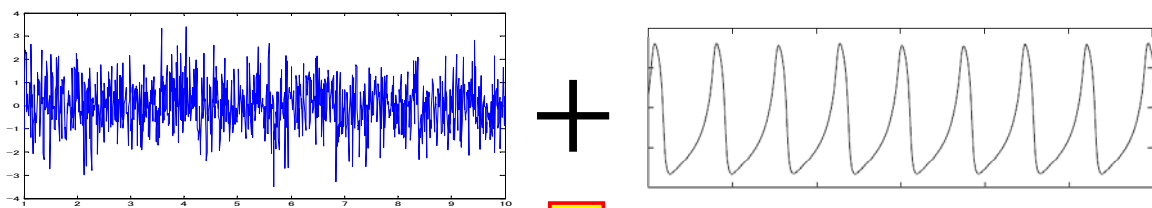
寺前順之介

理研・脳総研 & JSTさきがけ数学



1

脳、リズム、揺らぎ



私たちの反応の多様性はどこから来るのか？

2

内容

1. 揺らぎ、ノイズ
2. 神経系の揺らぎ
3. 神経系のリズム
4. リズムと揺らぎ

3

内容

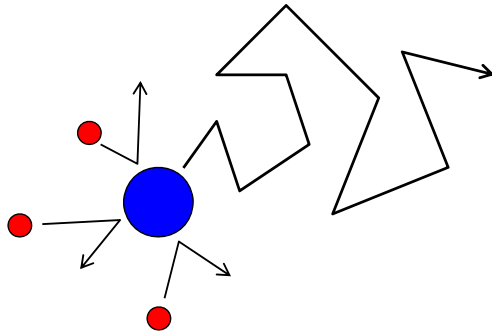
1. 揺らぎ、ノイズ
2. 神経系の揺らぎ
3. 神経系のリズム
4. リズムと揺らぎ

4

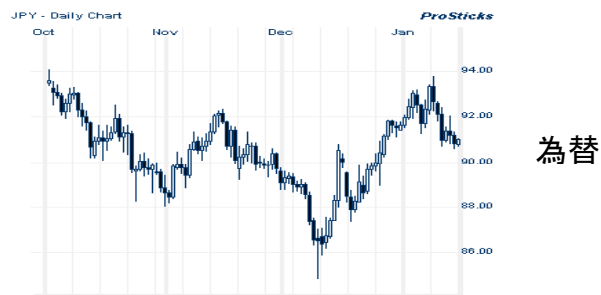
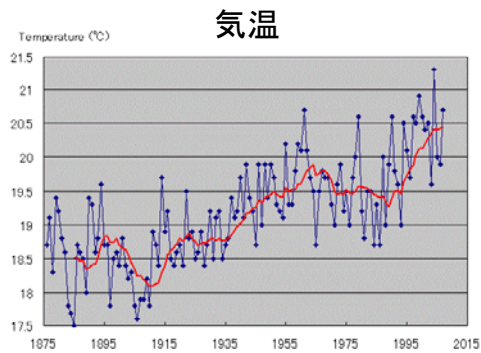
揺らぎ、ノイズ

確率的な時間変動

ブラウン運動、熱揺らぎ



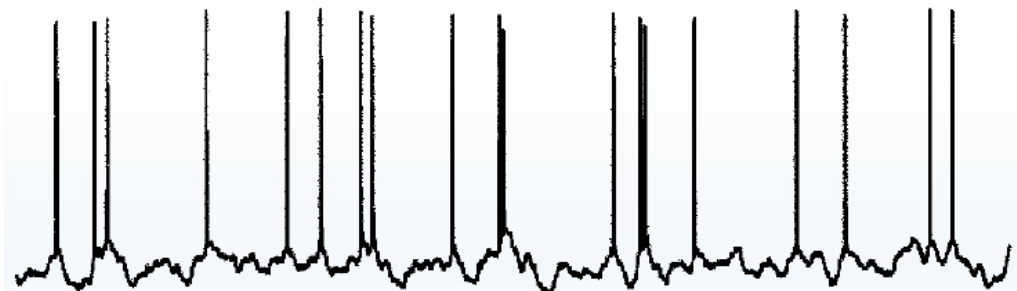
自然界の小さなものは
全て揺らいでいる



5

なぜノイズを考えるのか？

- 脳は**確率的情報処理システム**
- **神経活動は大きく揺らいでいる**



6

内容

1. 揺らぎ、ノイズ

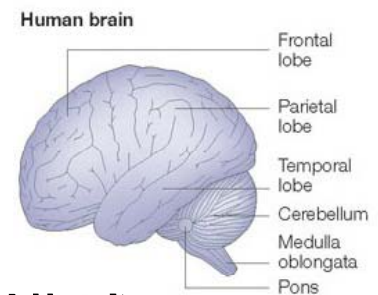
2. 神経系の揺らぎ

3. 神経系のリズム

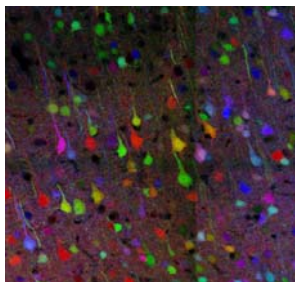
4. リズムと揺らぎ

7

中枢神経系



脳は膨大な数の神経細胞で構成



("Brainbow", 2007, Nature)

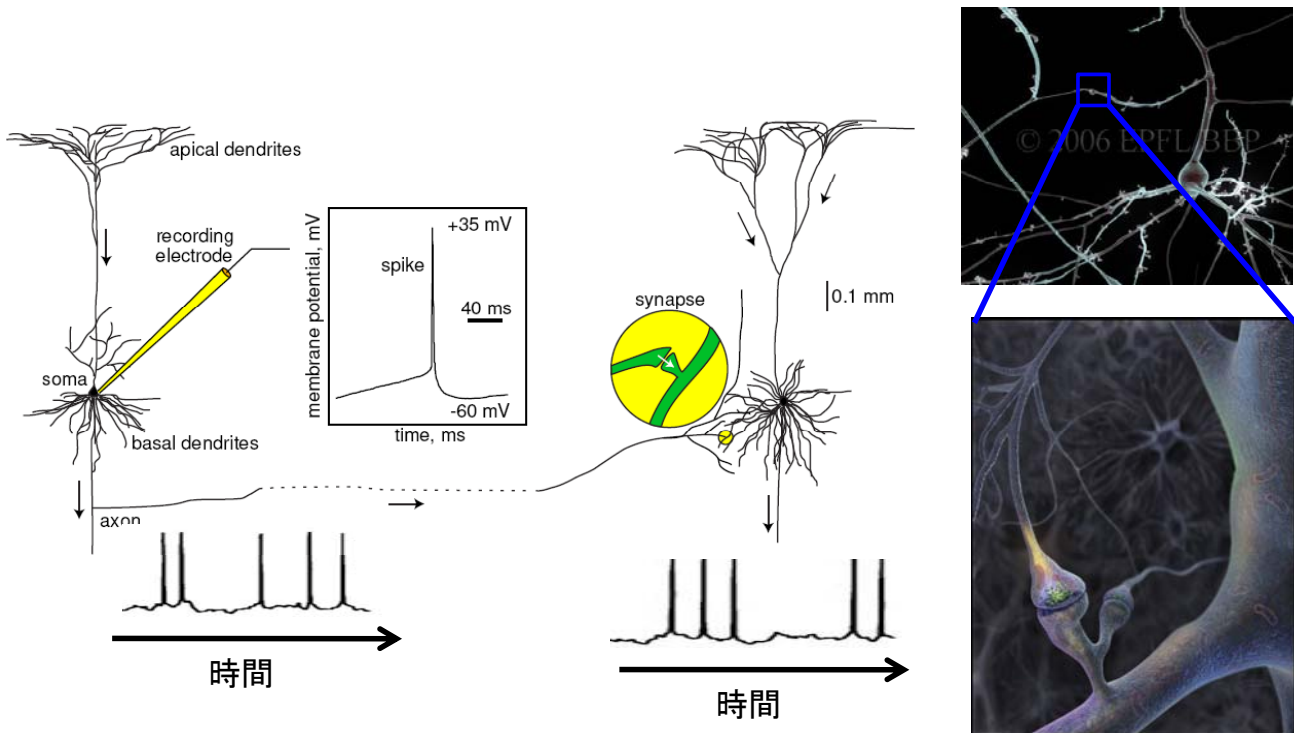


(Blue Brain Project, 2006)

大脳皮質だけで数百億個
それぞれ数千の入力を受ける

8

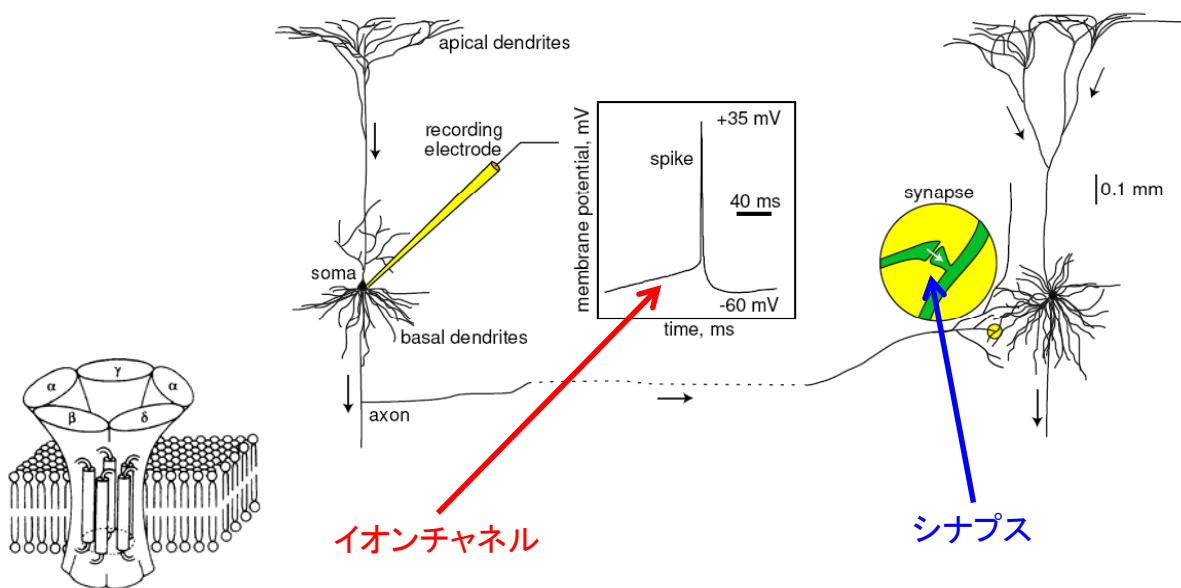
スパイク発火による情報伝達



9

神経細胞の揺らぎの起源は？

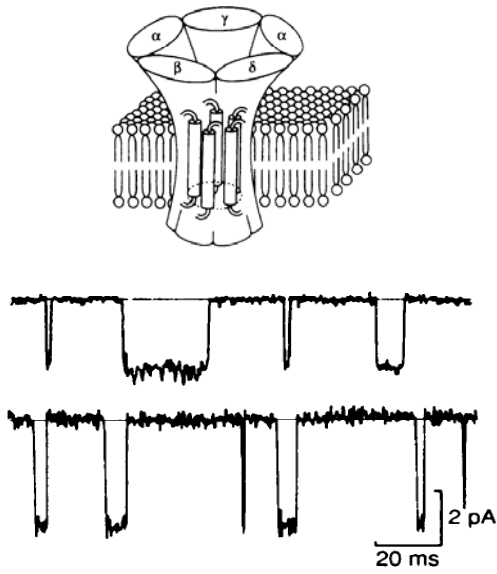
熱揺らぎ？



10

イオンチャネルの揺らぎ？

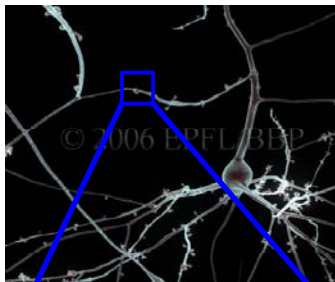
Sakmann, 1992, Nobel lecture



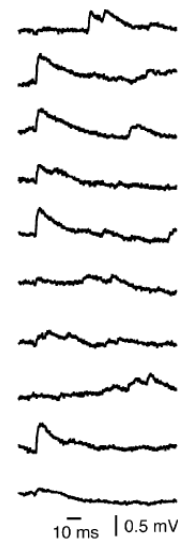
Strassberg & deFelice, 1993

→ NO!

シナプス伝達の失敗？



B Single trials



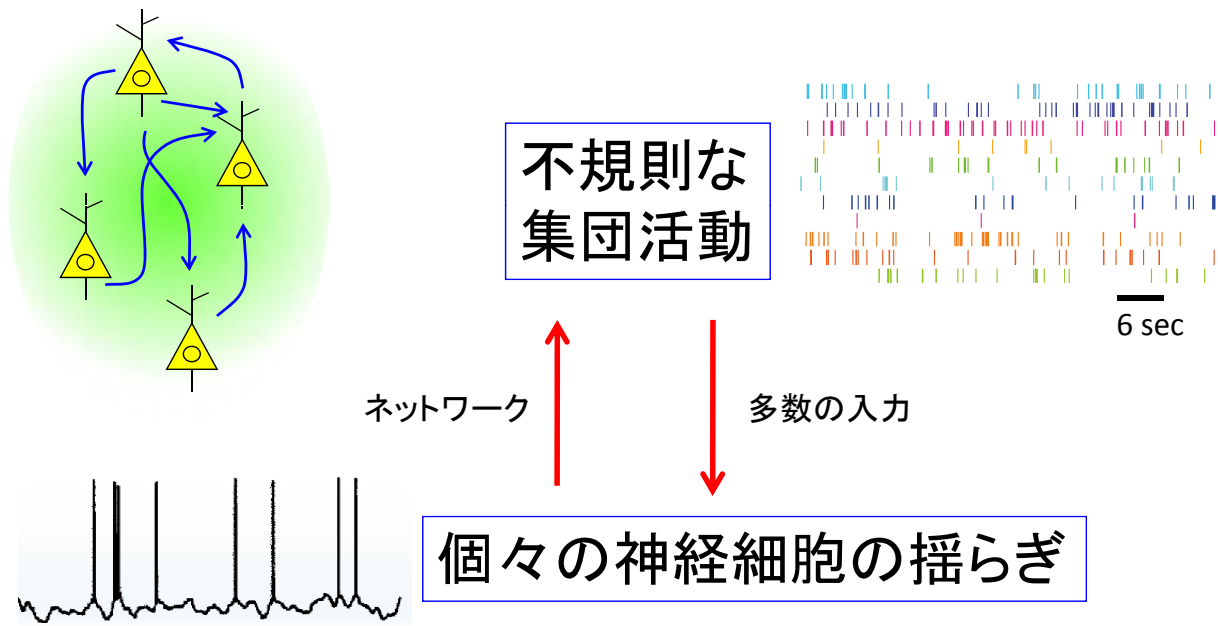
A Single trials



Lefort et.al, 2009, Neuron

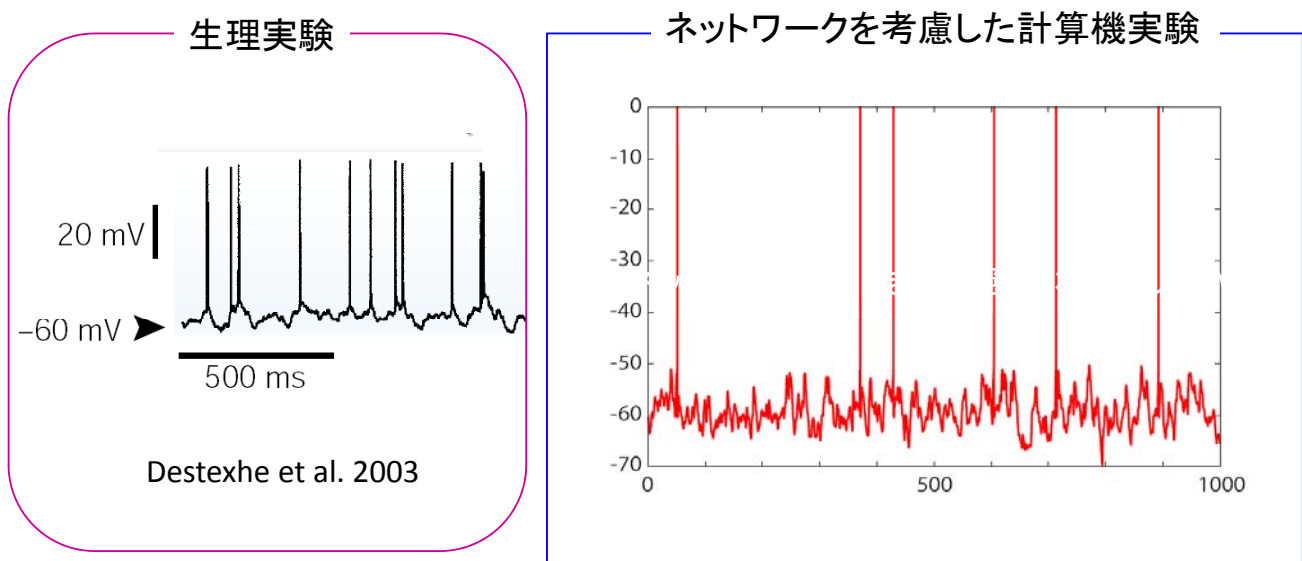
→ NO!

神経ネットワークが揺らぎを作っている



13

計算機実験の結果



→ YES!

神経ネットワークが揺らぎを積極的に生成している！

14

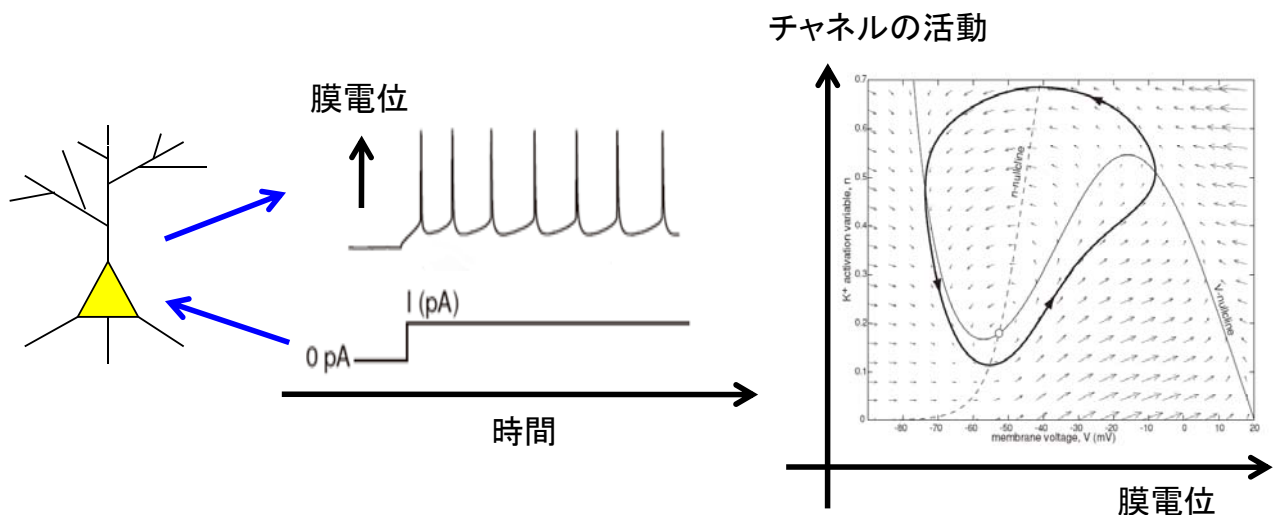
内容

1. 揺らぎ、ノイズ
2. 神経系の揺らぎ
3. 神経系のリズム
4. リズムと揺らぎ

15

神経細胞は安定した振動子

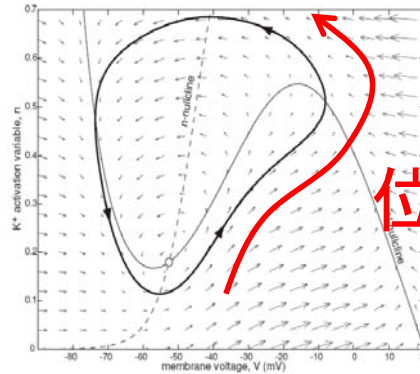
一定の入力 → 周期的にスパイク発火



16

神経細胞は安定した振動子

ホタルの明滅
カエルの鳴き声
心臓の鼓動
体内時計
神経細胞
メトロノーム
単振子 ×

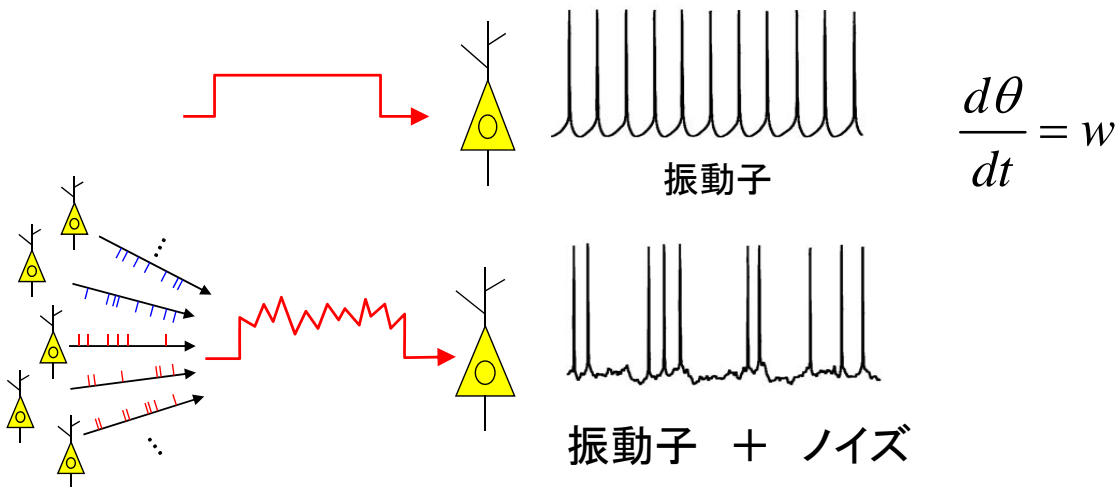


振動のタイミングは
位相だけで書ける

$$\frac{d\theta}{dt} = w + Z(\theta)p(t)$$

17

脳内の神経細胞は 揺らぎを受ける振動子



$$\frac{d\theta}{dt} = w + Z(\theta)f(t)$$

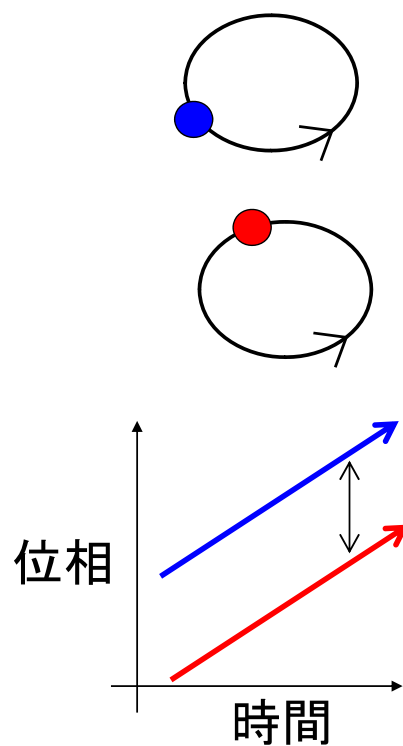
18

内容

1. 揺らぎ、ノイズ
2. 神経系の揺らぎ
3. 神経系のリズム
4. **リズムと揺らぎ**

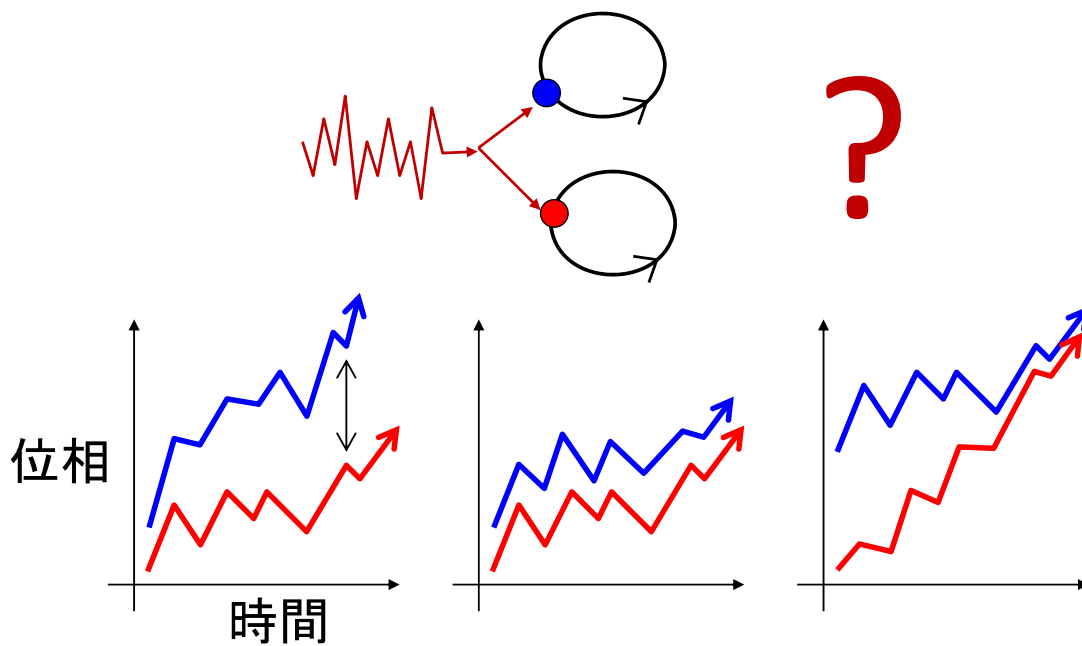
19

振動子のノイズ同期



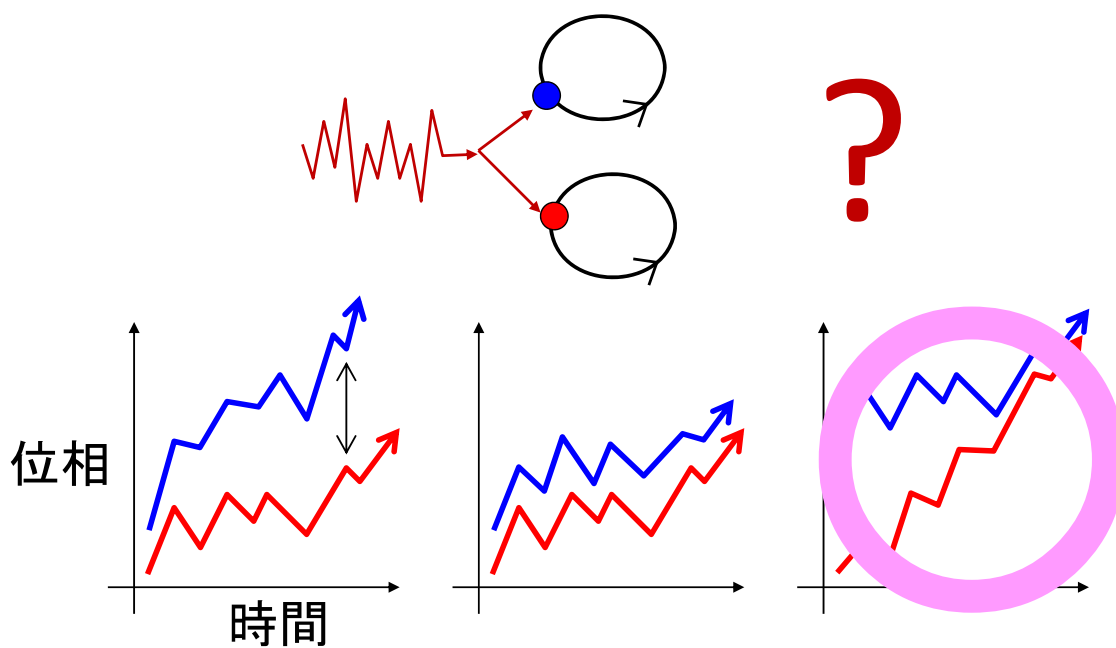
20

振動子のノイズ同期



21

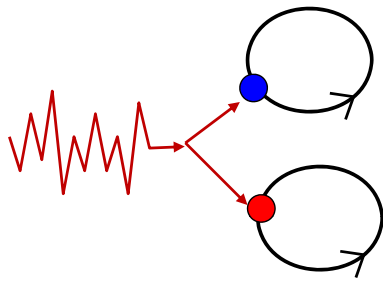
振動子のノイズ同期



ノイズは振動子を必ず同期させる

22

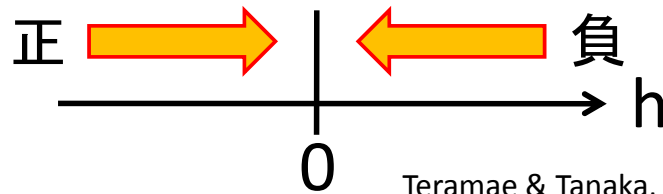
振動子のノイズ同期



$$\frac{d\theta_1}{dt} = \omega + Z(\theta_1) f(t)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \omega + Z(\theta_2) f(t)$$

$$h = \theta_2 - \theta_1 \longrightarrow \frac{dh}{dt} \approx \left(- \left\langle \left(\frac{dZ}{d\theta} \right)^2 \right\rangle \right) h$$

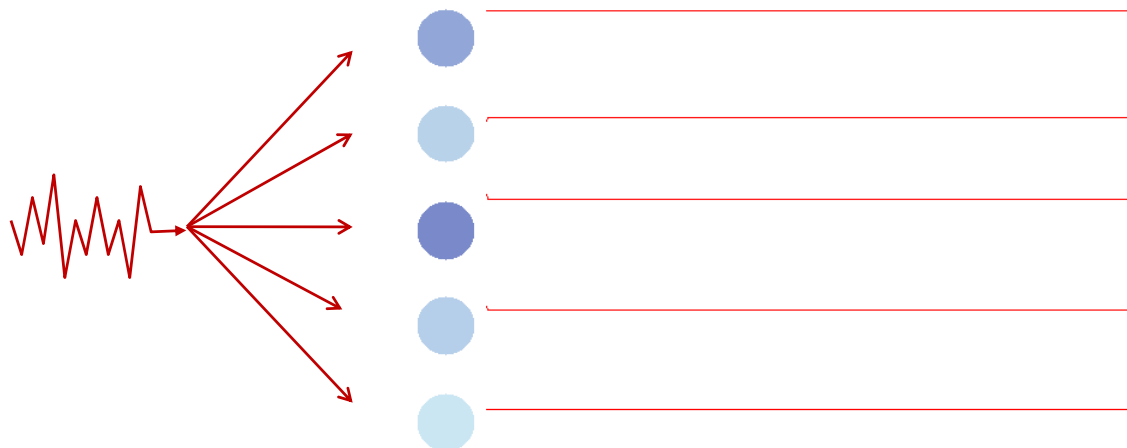


Teramae & Tanaka, 2004, Phys. Rev. Lett

23

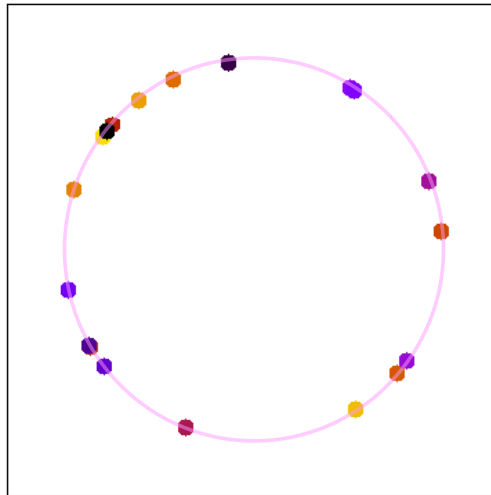
振動子のノイズ同期

8



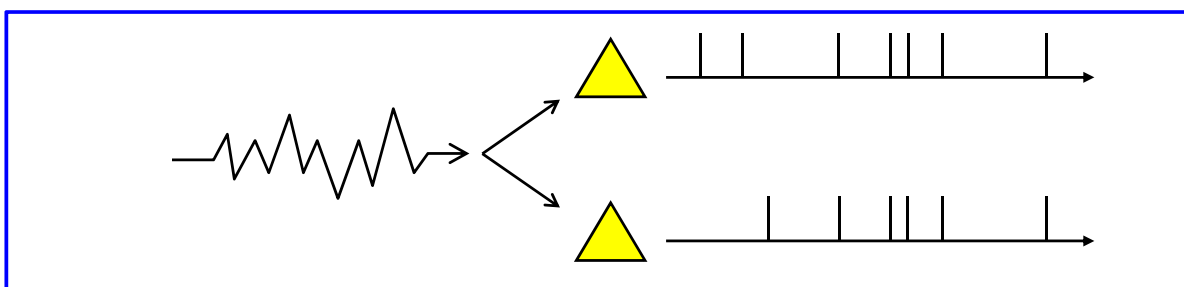
24

振動子のノイズ同期

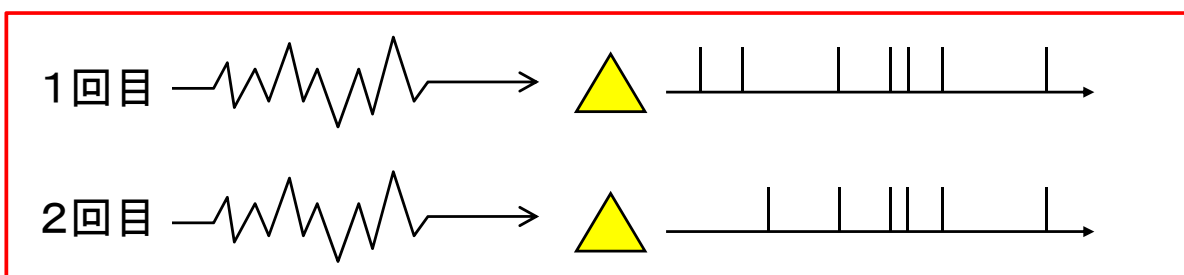


25

ノイズ同期＝神経細胞の応答の一様性



||



26

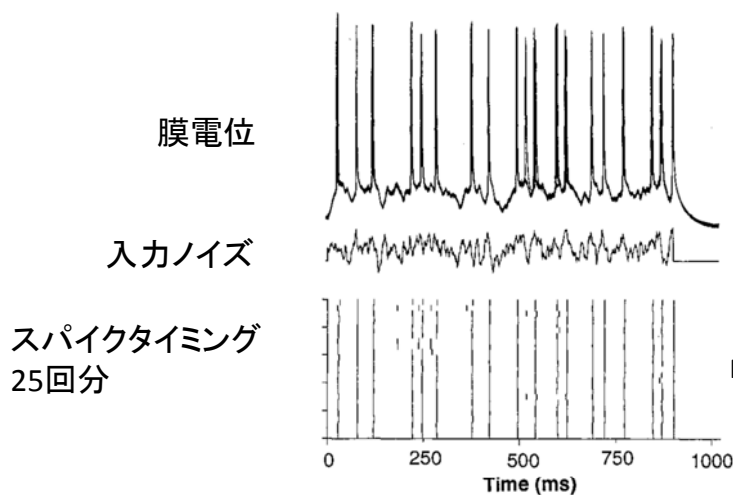
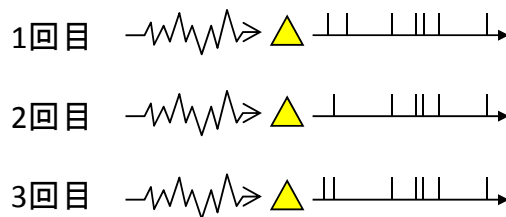
神経細胞の応答は一様

ノイズがなければ、
神経細胞の発火タイミングは、ずれたまま

ノイズが神経細胞の応答を一様にする
(信頼性を与えている)

27

ノイズによる応答の一様化



Mainen & Sejnowski, 1995, Science

28

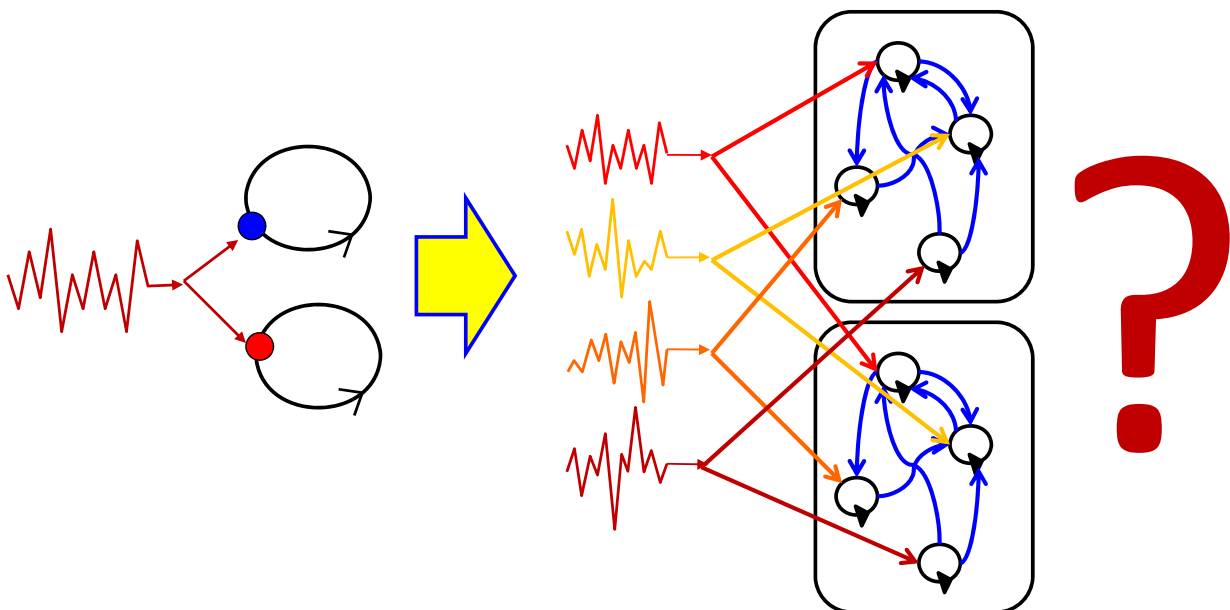
神経細胞は必ず同じように応答する

では、私たちの応答の多様性はどこから来るのか？

神経細胞と脳の違いは何か？

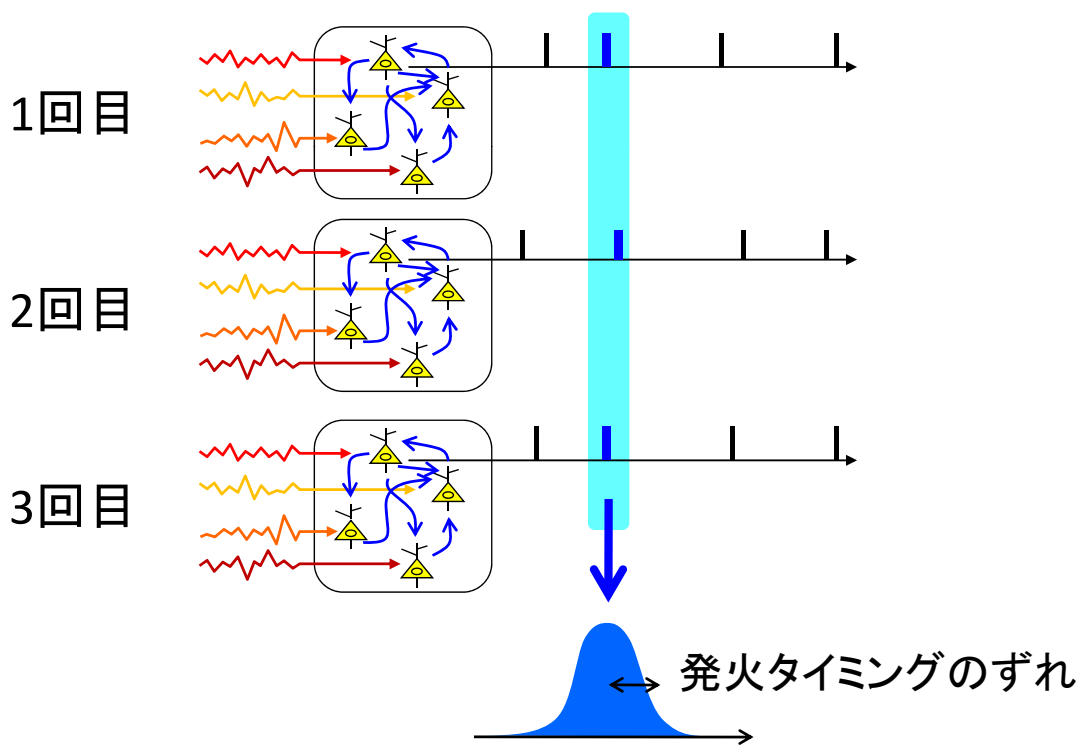
29

ネットワークもノイズ同期するか？



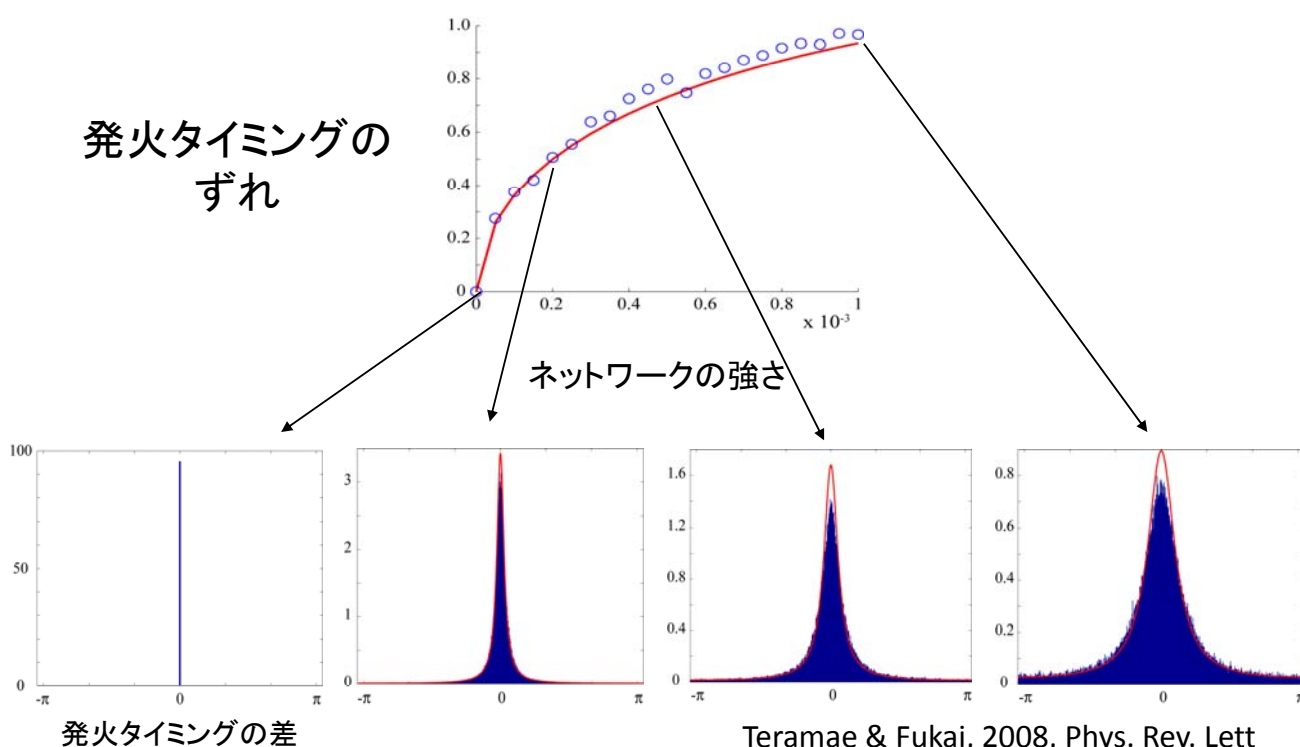
30

ネットワークの応答



31

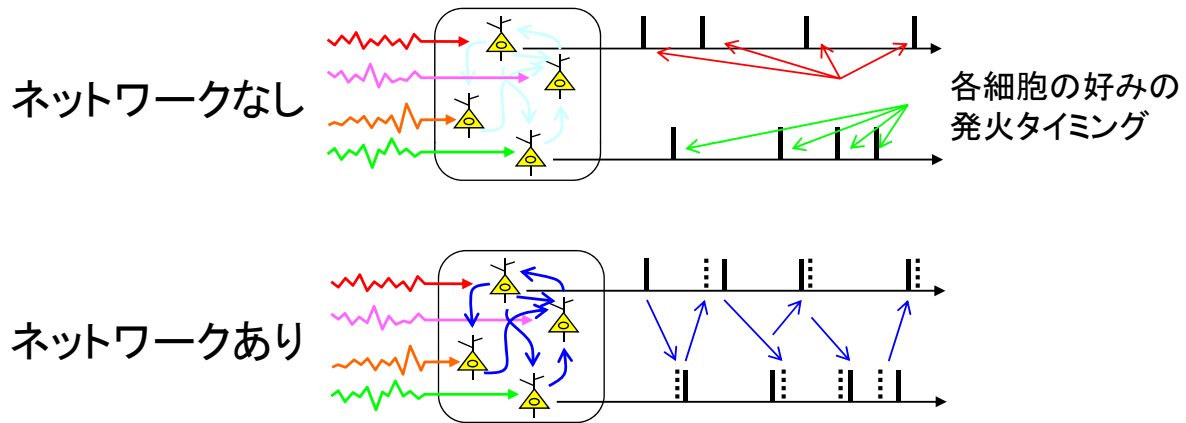
ネットワークでは応答が多様化



Teramae & Fukai, 2008, Phys. Rev. Lett

32

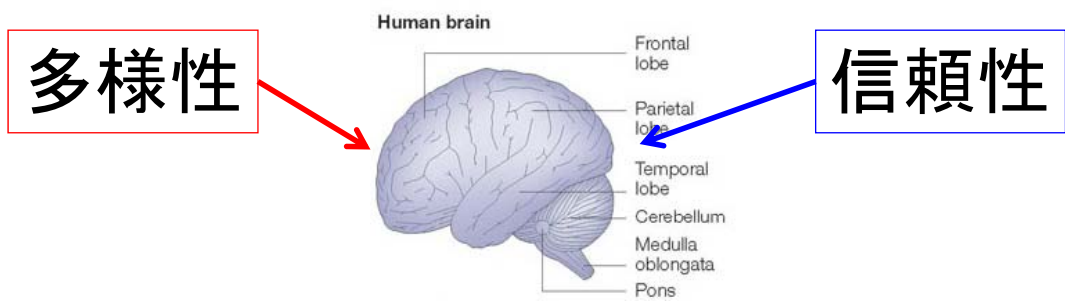
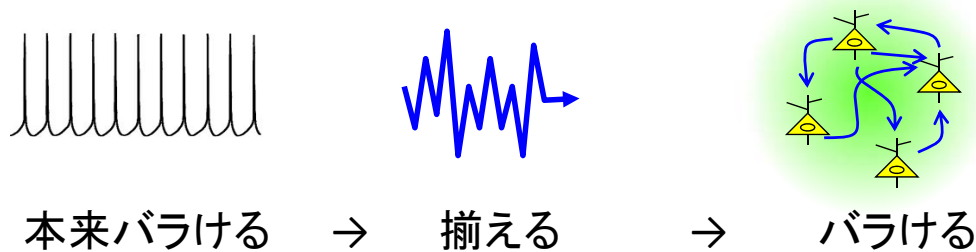
ネットワークの応答



ネットワークを介して、
タイミングを少しずつずらし合う

応答の信頼性と多様性

リズム → ノイズ → ネットワーク



まとめ

- 神経系は揺らぎを積極的に生成・維持し利用している。
- ノイズが応答の信頼性を生み、ネットワークが多様性を生む。
- リズム、ノイズ、ネットワークの三者の共同作業

質問、コメント → teramae@riken.jp