

石川顕一（東京大学内部向け講義資料）

物質・生命一般

「シミュレーションで分かる脳と生体」
雑音（ノイズ）を利用する生体の神秘

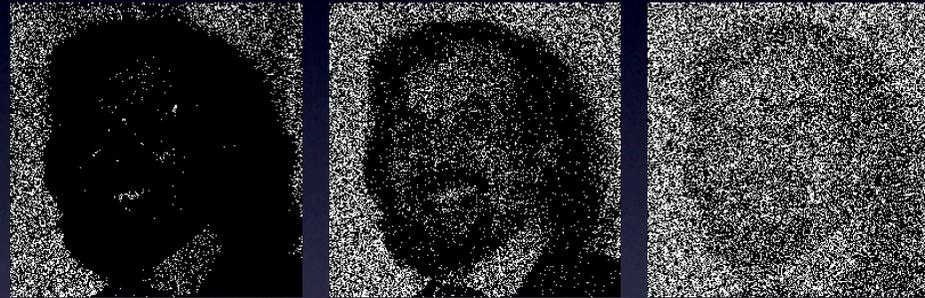
石川顕一

<http://ishiken.free.fr>

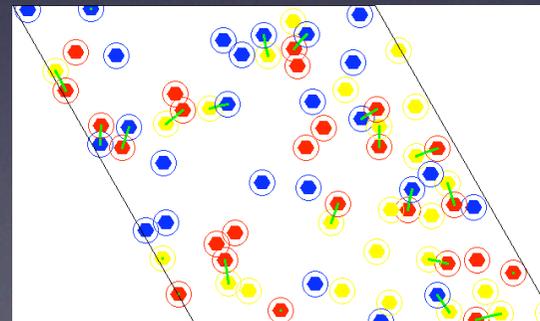
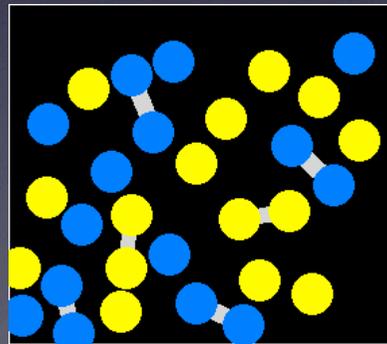
工学部システム創成学科 B コース
(シミュレーション・数理社会デザインコース)

今日の内容

- 雑音 (ノイズ) を利用する生体の神秘



- 細胞膜タンパク質の自己組織化



雑音（ノイズ）を利用 する生体の神秘

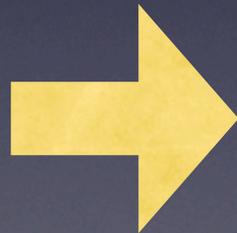
生体分子や細胞はゆらぎにさらされている

- 周囲の水分子の衝突 (熱ゆらぎ)
- 細胞シグナルのゆらぎ・誤差
- 環境中の雑音 (ノイズ)

ナノメートルサイズの生体分子やミクロンサイズの細胞にとって、これらのゆらぎや誤差 (ノイズ) はとても大きい。

生体はゆらぎとどう付き合っているのか？

- ゆらぎを克服する。
 - 環状アデノシン 1 リン酸 (cAMP)のある方へ向かう細胞性粘菌の細胞内情報処理



前回の講義

生体はゆらぎとどう付き合っているのか？

- ゆらぎ（雑音）を利用する。
 - ザリガニ（水の動きから天敵を感知）
 - コオロギ（気圧の変化から天敵を感知）
 - ヘラチョウザメ（電気信号からプランクトンを感知）

微弱な信号を検知しないといけない...

ゆらぎ（雑音）を利用する。

雑音レベル40

雑音レベル120

雑音レベル400



適度な雑音は生物にとって有利

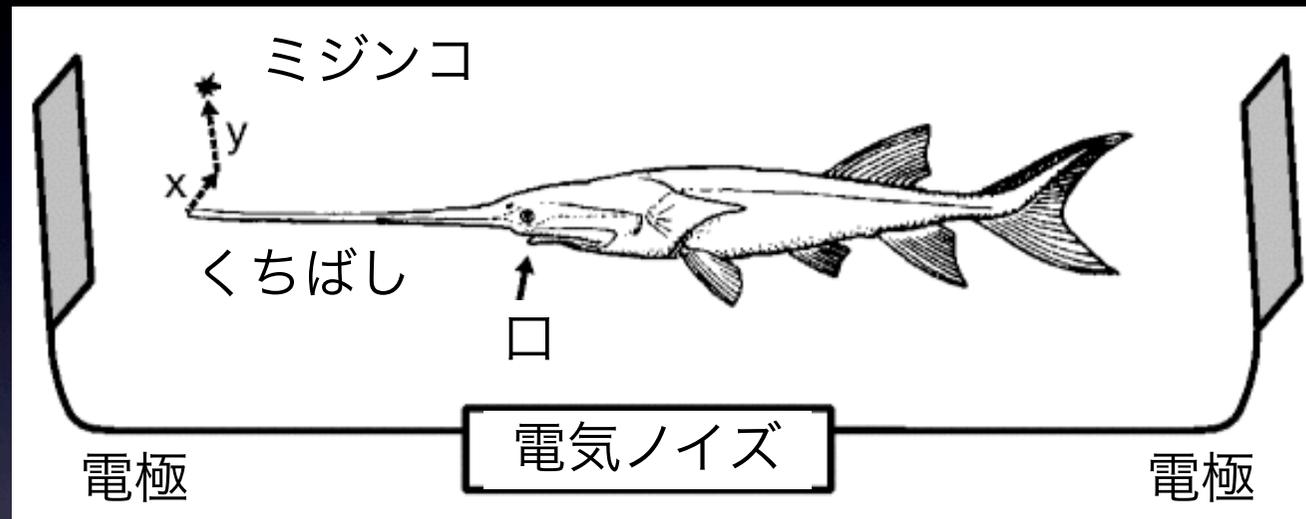
<http://neurodyn.umsl.edu/sr/>

ヘラチョウザメ



- 電気受容器を使って、餌（動物プランクトン）からの電気信号をキャッチ
- 動物プランクトン（ミジンコなど）：泳ぐときなどに神経興奮→微小な電気信号

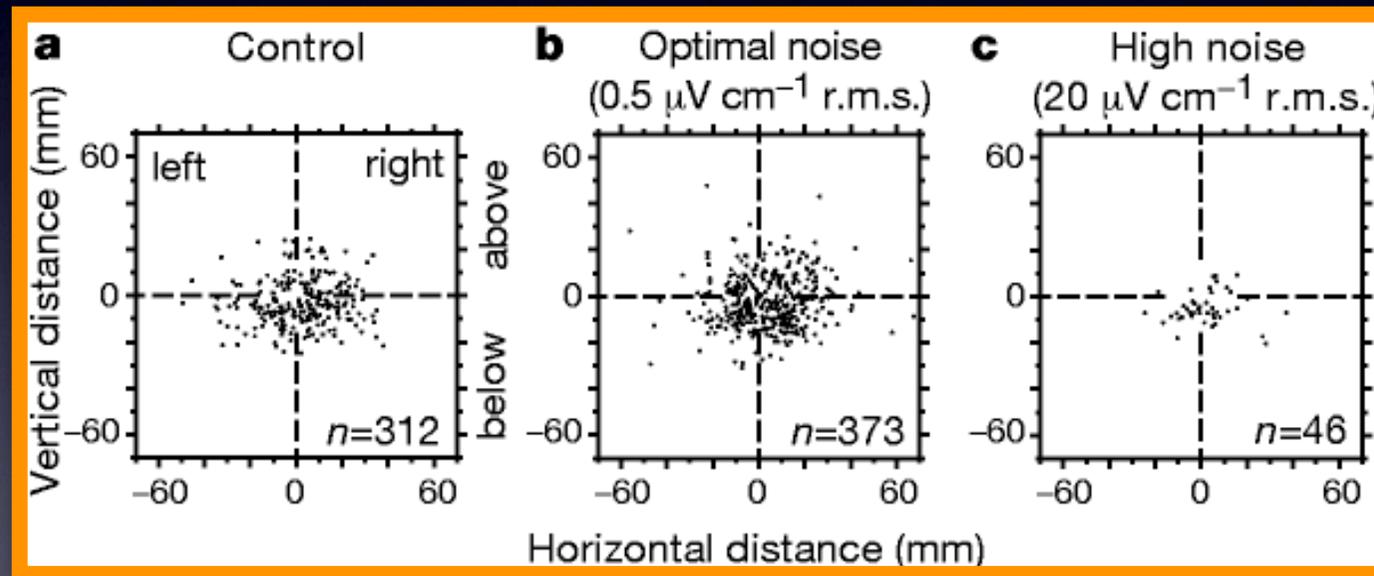
実験



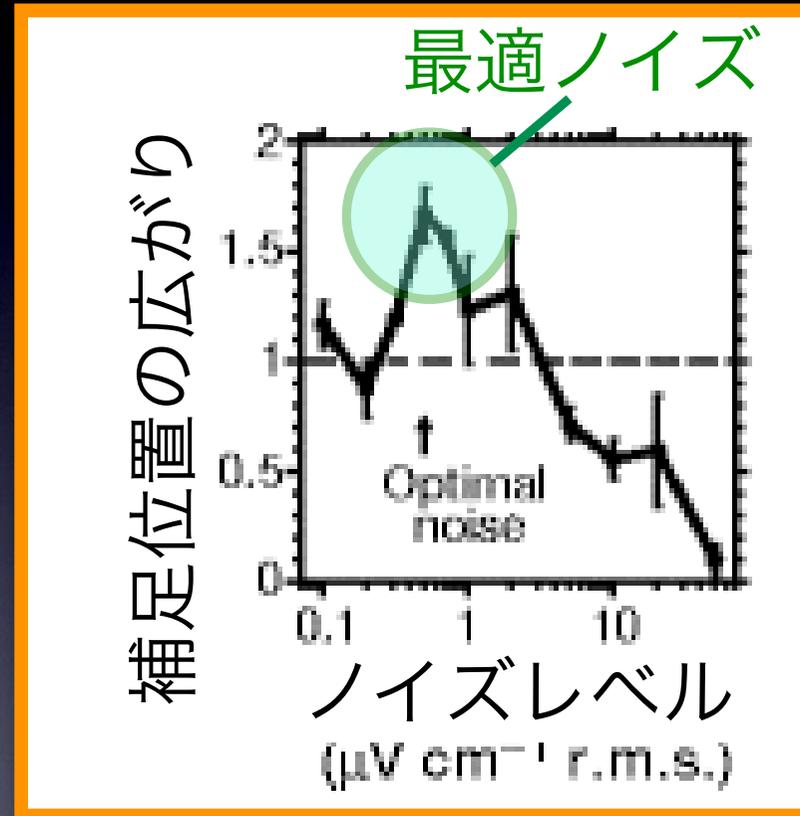
- ミジンコを捕らえた位置(x,y)の分布を測定
- 広い分布：遠くのプランクトンを発見
- 狭い分布：近くのプランクトンしか発見できない。

補足位置の分布

ノイズなし 最適ノイズ 高ノイズ



補足位置の広がり



適度なノイズは捕食活動を助ける。

様々な生物が雑音を利用している。

- ザリガニ (水の動きから天敵を感知)
- コオロギ (気圧の変化から天敵を感知)
- ヘラチョウザメ (電気信号からプランクトンを感知)
- 視覚・聴覚

その奥にひそむ共通のメカニズムとは？

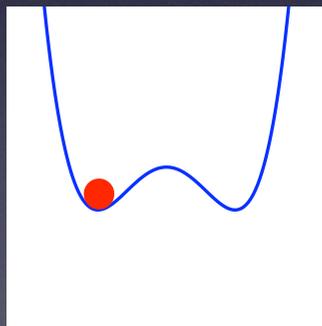


振動を検出

振動を検出するには？

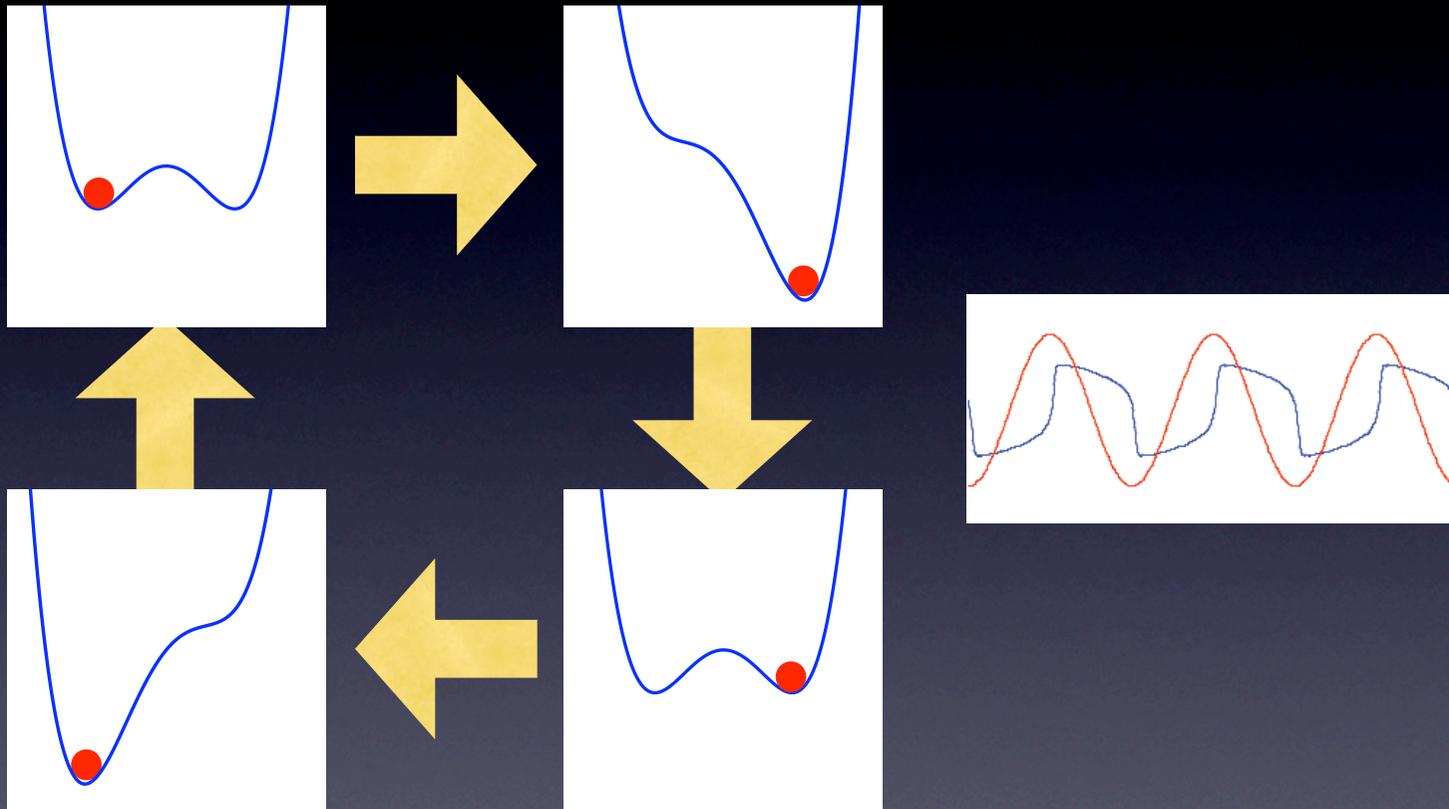
- 共通のメカニズム→なるべくシンプルなモデルを考える

2つ井戸のあるポテンシャル



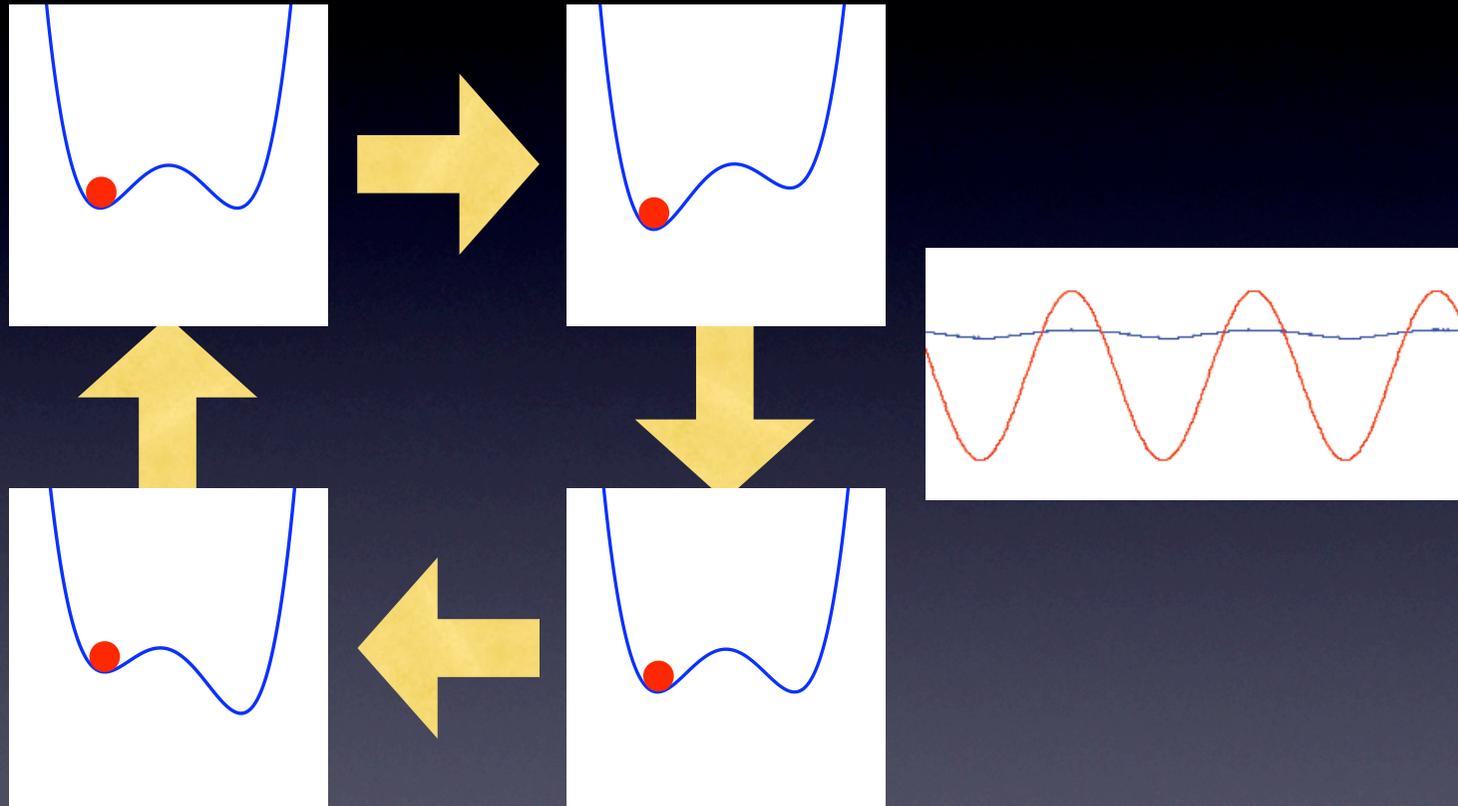
$$U(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4$$

振動 (信号) が加わると



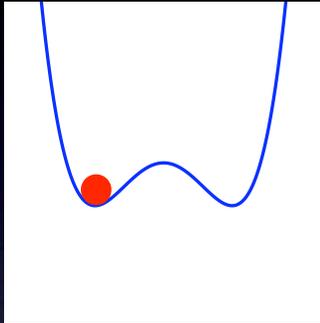
http://www.lis.inpg.fr/realise_au_lis/demos/potbimo/SRApplet.html

振動 (信号) が小さいと



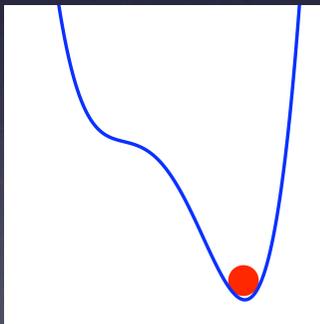
ボールの位置が変わらない → 検出できない

数学モデル



ポテンシャル $U(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4$

力 $F(x) = -\frac{dU}{dx} = ax - bx^3$



振動 $e(t) = \epsilon \sin(2\pi ft)$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} = F(x) + e(t)$$

ニュートン方程式

ノイズのある時

揺動力 (Random force) $n(t)$

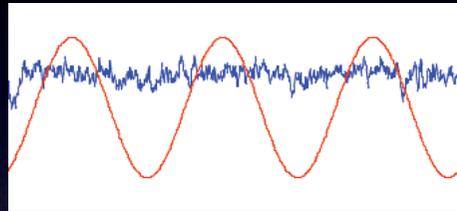
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} = F(x) + e(t) + n(t)$$

ランジュバン方程式

http://www.lis.inpg.fr/realise_au_lis/demos/potbimo/SRApplet.html

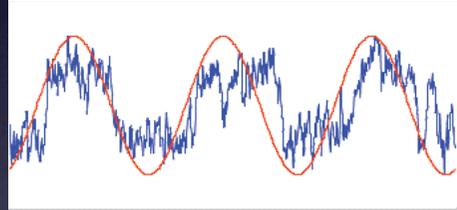
シミュレーション結果

ノイズ小



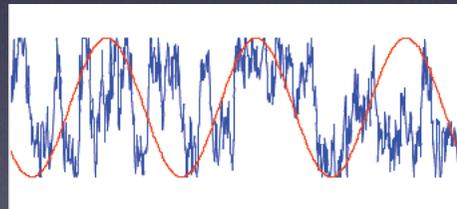
一方の井戸に
トラップ

ノイズ中

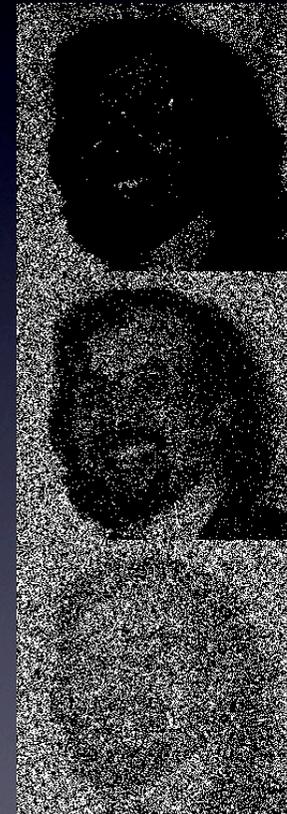


ノイズのおか
げでジャンプ

ノイズ大



でたために
移動

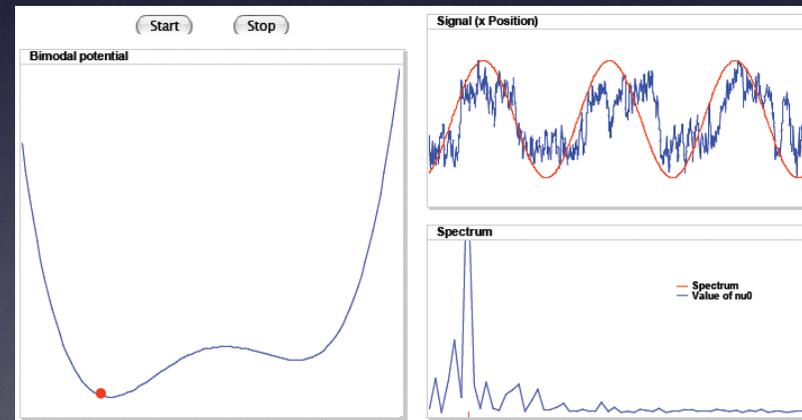


シミュレーション結果

微弱な周期変動がノイズの助けによって増幅される。

確率共鳴

- 複数の (安定) 状態とその間のバリアー
- 微小な (周期的な) 信号
- ノイズ



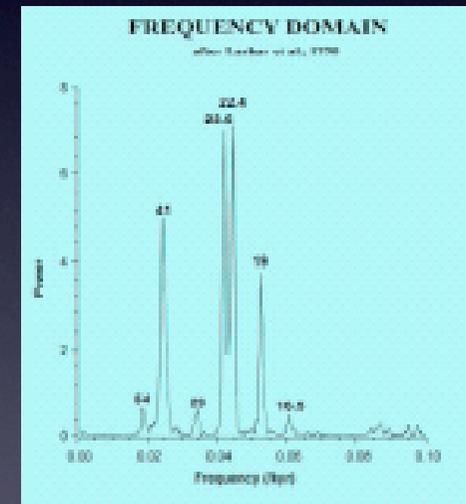
確率共鳴の歴史 (1)

- 1930年ミランコビッチ

「地球の気候変動における氷河期の到来は、地軸のゆらぎによって生じる日射量の変化による。」

4.1万年、2.3万年、1.9万年

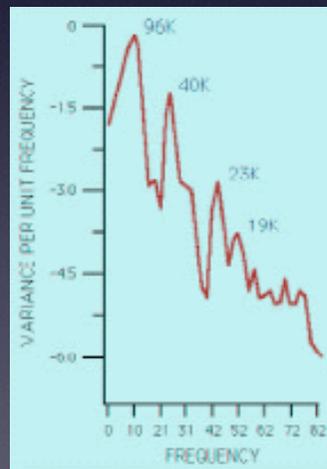
- 日射量の変動はごくわずかで、氷河の量を激変させるとは考えられない。



確率共鳴の歴史（2）

- 1976年

氷床の体積の変化から、気候変動の周期が解析される。



10万年、4万年、

2.3万年、1.9万年

少なくとも、部分的には日射量
の変化と関係がある！

確率共鳴の歴史（3）

- 1982年ベンチら

- 日射量のわずかな周期的変動
- 大気や海的作用に起因するランダムな変動

が氷河期の周期を引き起こす。

- ただし、もっとも大きい10万年の周期は説明できない。

興味のある人は...

石川顕一



工学部システム創成学科 B コース
(シミュレーション・数理社会デザインコース)

ウェブ <http://ishiken.free.fr>

メール ishiken@q.t.u-tokyo.ac.jp