

集積回路に宿る生命

——生体分子のリズムと形を模倣する——

雨宮好仁

(北海道大学 情報科学研究科)

生き物の機能を電子デバイスで模倣する

(生体の機能)

(電子デバイス化)

- 認識と判断 → 人工知能と脳型コンピュータ
- 視覚や聴覚 → インテリジェントセンサ
- 生物が生きていること → ?

(生命の舞台)

反応拡散系 — 化学的な複雑系

(内容)

(1) **生命科学**における二つのアプローチ

「分子生物学 / 分子遺伝学」と「**反応拡散系** の非線形科学」



(生命体を組み立てる部品の研究)



(**生命を生み出すメカニズム**の探究)

(2) **反応拡散系**とは

非平衡の化学反応系

非線形ダイナミクス

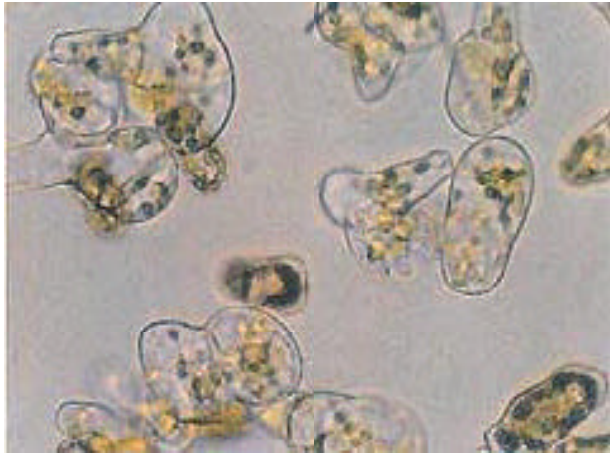
「**散逸構造**」の発生

(3) **電子デバイス**で反応拡散系をつくる

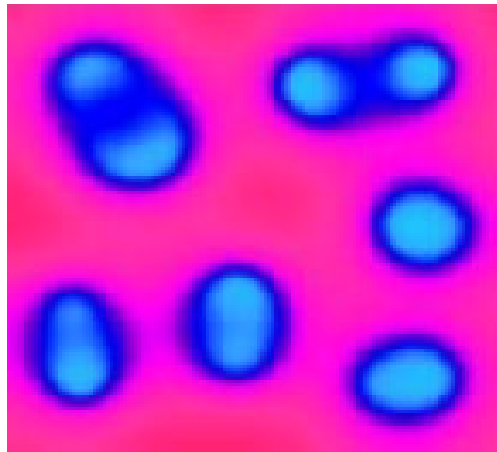
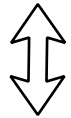
量子ナノ集積体による反応拡散デバイス

生き生きとした散逸構造のシミュレーション

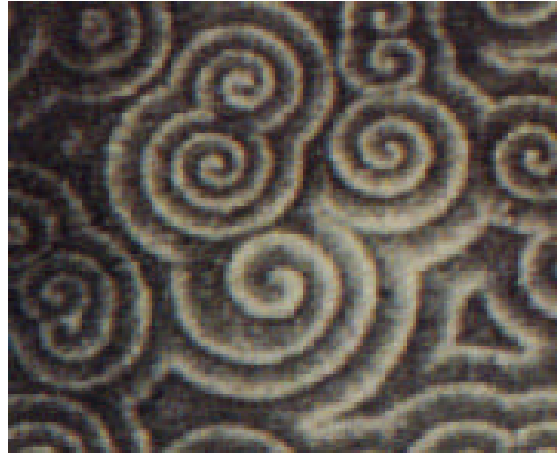
生命現象（上）と反応拡散ダイナミクス（下）の類似性



細胞の分裂と増殖



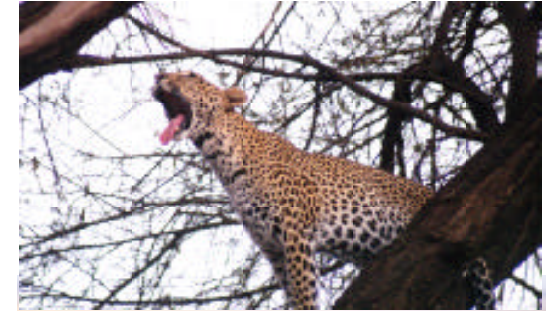
グレイスコット反応拡散系



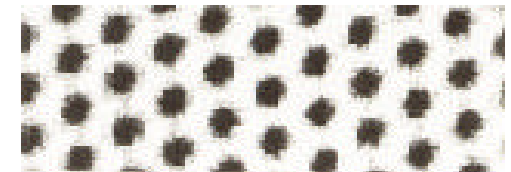
粘菌の集団が描くラセン模様



ブリュセレータ反応拡散系



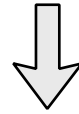
動物の体表にできる模様



チューリング反応拡散系

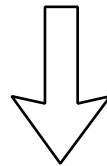
生命の全体像を理解する

生命体の部品（DNA や 蛋白質）の分子集団



時間的・空間的な秩序を自らつくり出す — 生きている —

どのようなメカニズムで？



反応拡散系の非線形科学

反応拡散系（化学的な複雑系）→ 「散逸構造」の発生

「生命は反応拡散系に生じた散逸構造の一種である」

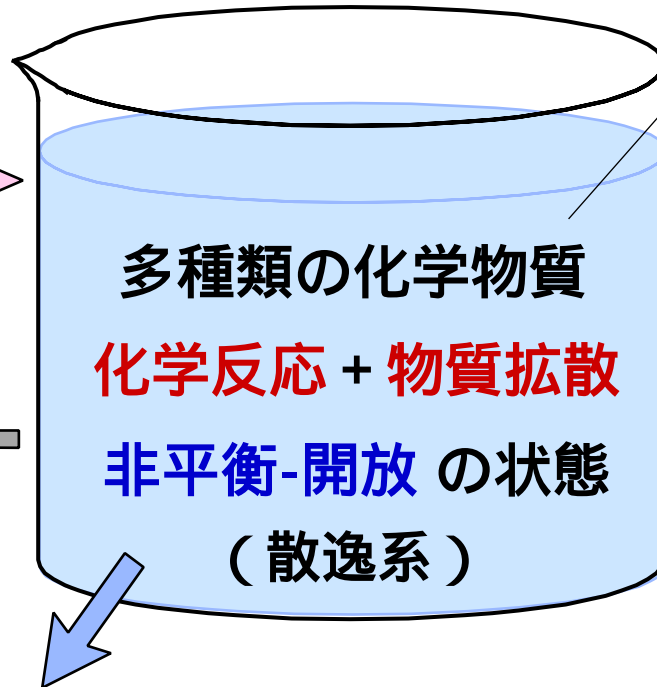
反応拡散系とは

化学反応系

系の変数：物質の濃度 (u, v, w, \dots)

初期物質
(エネルギー源)

反応生成物
(排泄物)



(反応拡散方程式)

$$\begin{cases} \frac{u}{t} = f(u, v, w, \dots) + D_u \nabla^2 u \\ \frac{v}{t} = g(u, v, w, \dots) + D_v \nabla^2 v \\ \frac{w}{t} = h(u, v, w, \dots) + D_w \nabla^2 w \\ \vdots \\ \vdots \end{cases}$$

↑ ↑
反応項 拡散項



物質の濃度 時間的・空間的な秩序の発生

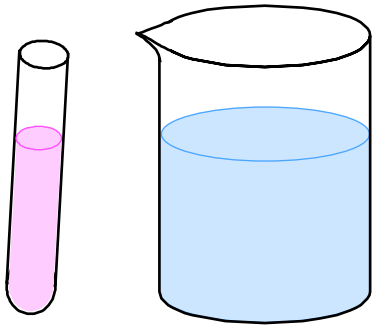
(成長・増殖・形態形成・自己組織化)

秩序ある時空間パターン：「散逸構造」

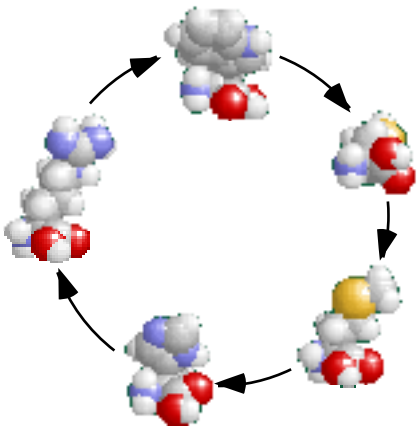
('dissipative structure' Prigogine, I.)

どこにでも存在する反応拡散系

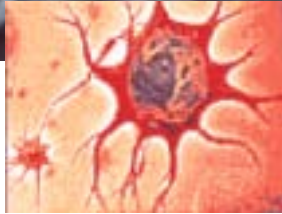
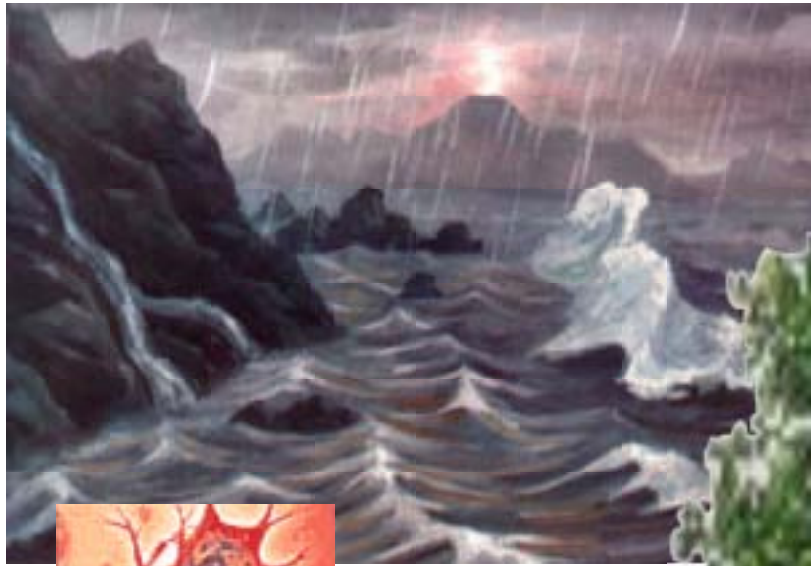
実験室の化学反応



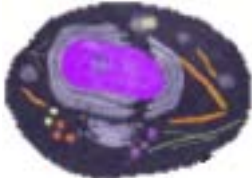
BZ 反応
CMA 反応
FIS 反応



海



細胞



地球

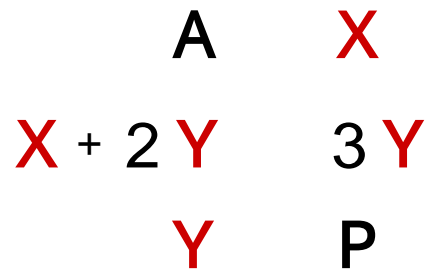


生きもの



生き生きしたダイナミクスを生む反応拡散系（その1）

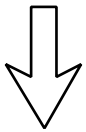
（グレイスコット系）



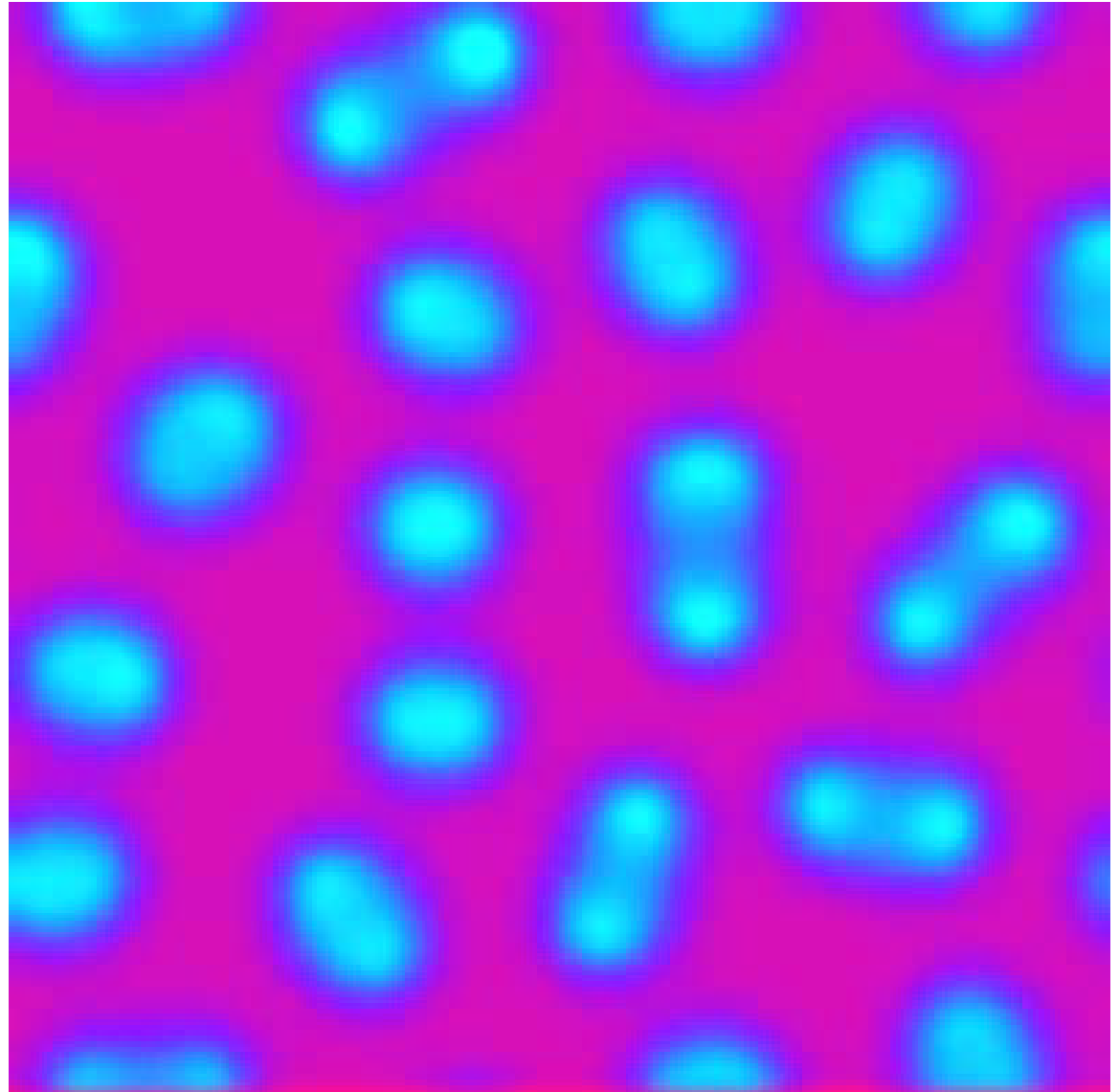
A : 初期物質

P : 最終生成物

X, Y : 中間生成物

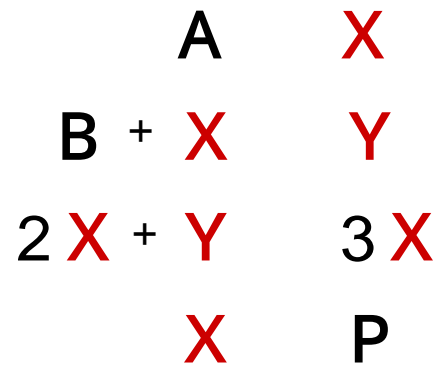


$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{X}{t} = -XY^2 + a(1-X) + D_X \nabla^2 X \\ \frac{Y}{t} = XY^2 - (a+k)Y + D_Y \nabla^2 Y \end{array} \right.$$

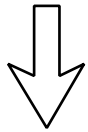


生き生きしたダイナミクスを生む反応拡散系（その2）

（ブリュセレータ系）



（ X, Y ：中間生成物）

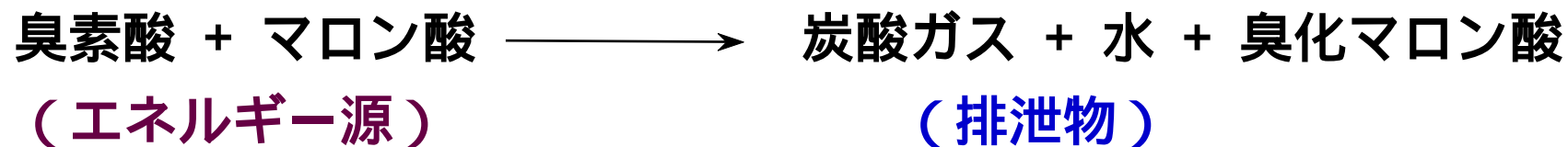
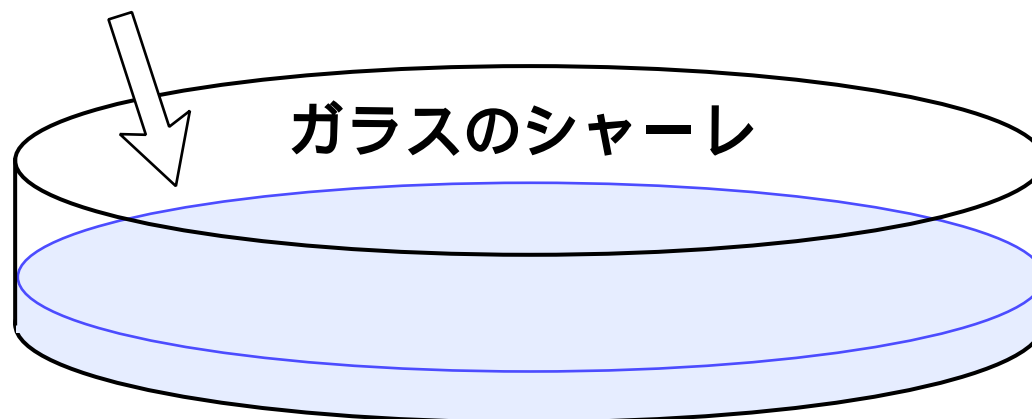


$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{X}{t} = a - (b + 1) X + D_X \nabla^2 X \\ \frac{Y}{t} = b X - X^2 Y + D_Y \nabla^2 Y \end{array} \right.$$



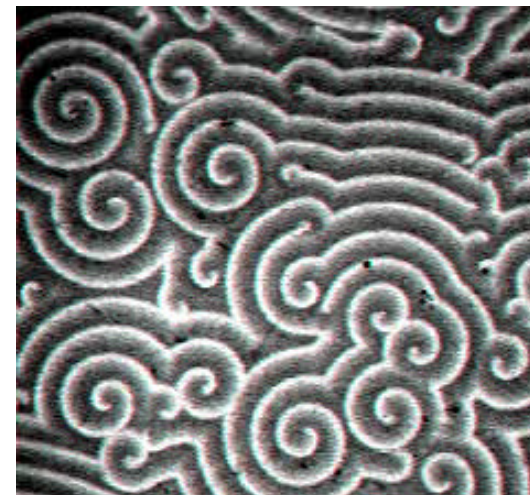
BZ反応（ベローソフ-ジャボチンスキー反応）

臭素酸カリウム, 臭化カリウム, マロン酸, 金属触媒, 硫酸



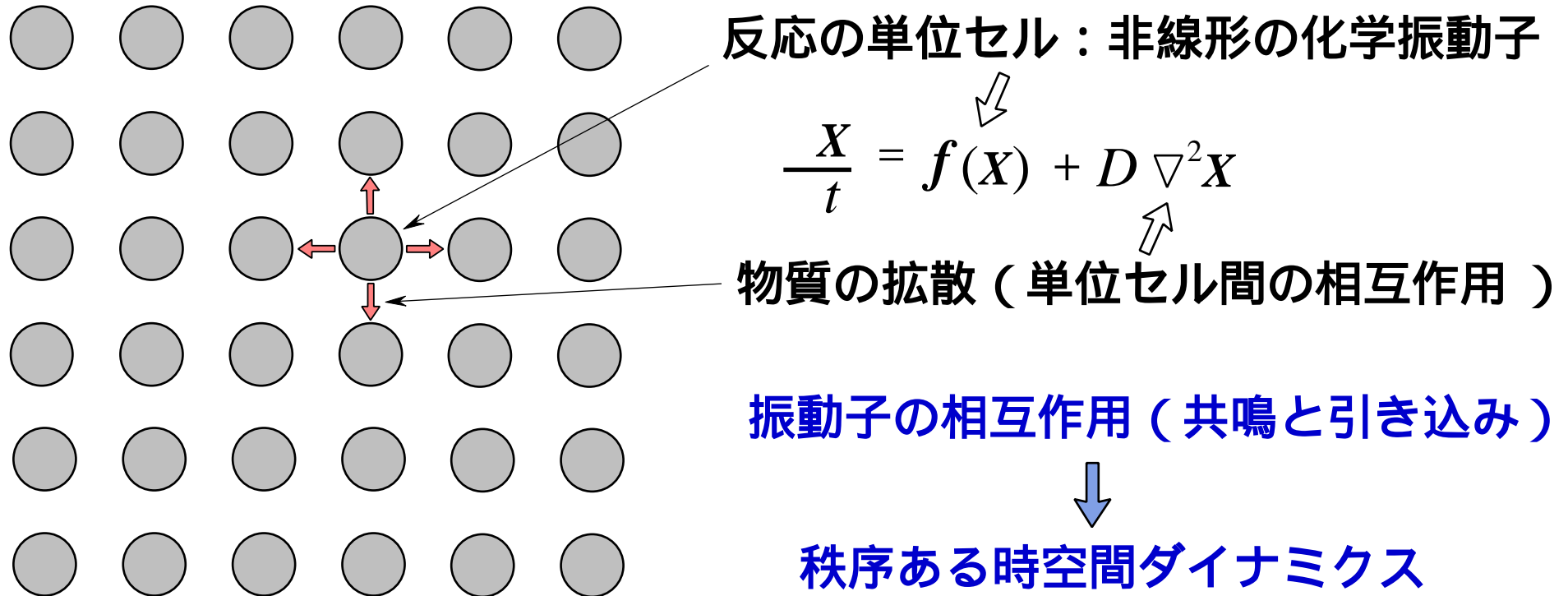
反応系の主役

臭素イオン
亜臭素酸
金属触媒イオン



電子デバイスで反応拡散系をつくるには

「反応拡散系は **多数の化学振動子が集合した反応場** である」

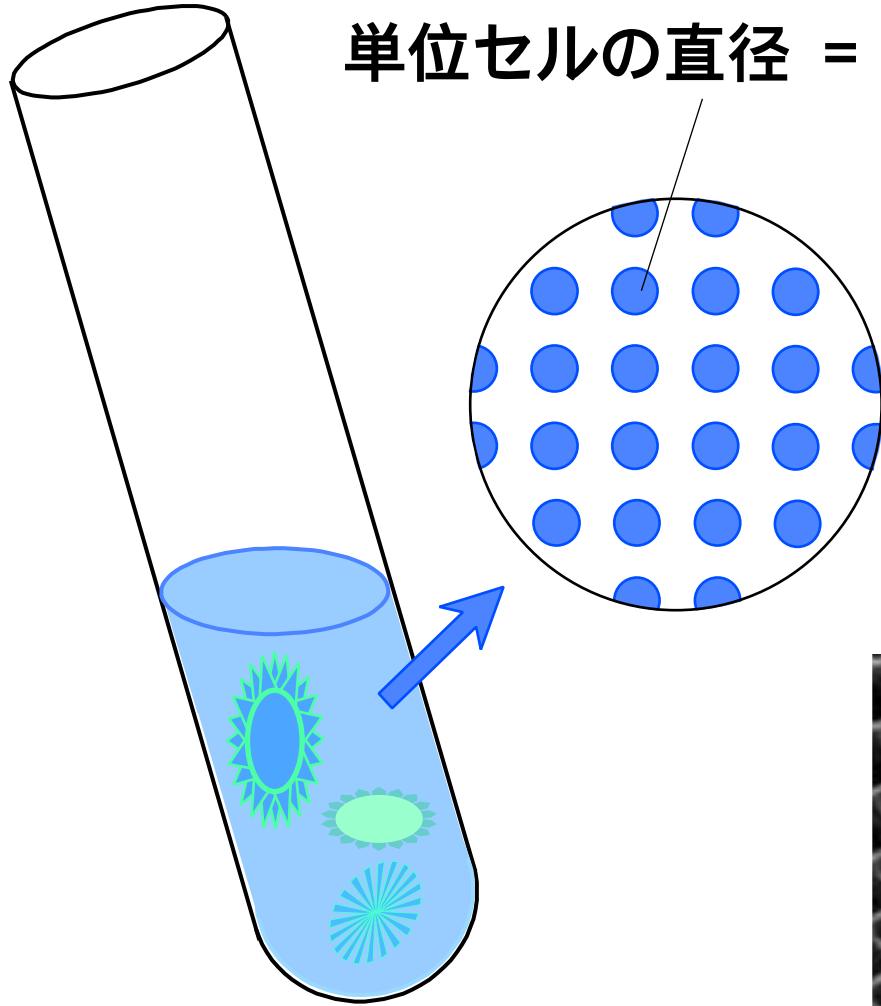


反応拡散デバイスへのアプローチ

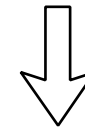


反応拡散デバイスには **量子ナノ構造** が必要である

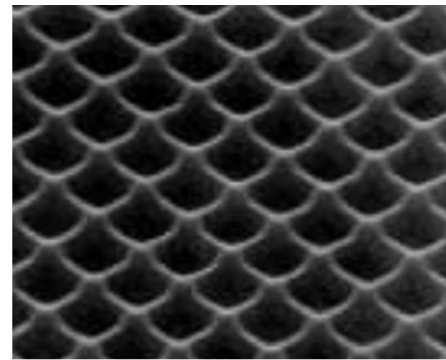
単位セルの直径 = 数 μm \rightarrow 振動子 100 万個！



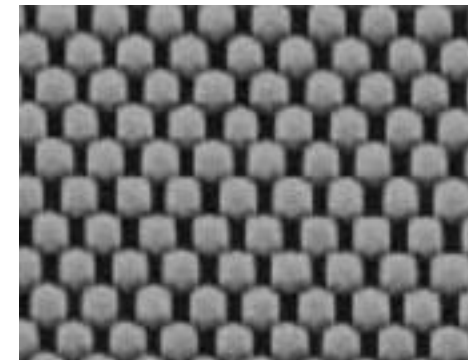
- 極めて低電力の非線形振動子
- 結合振動子の**大規模**な集積体



量子ドット集積体 の利用



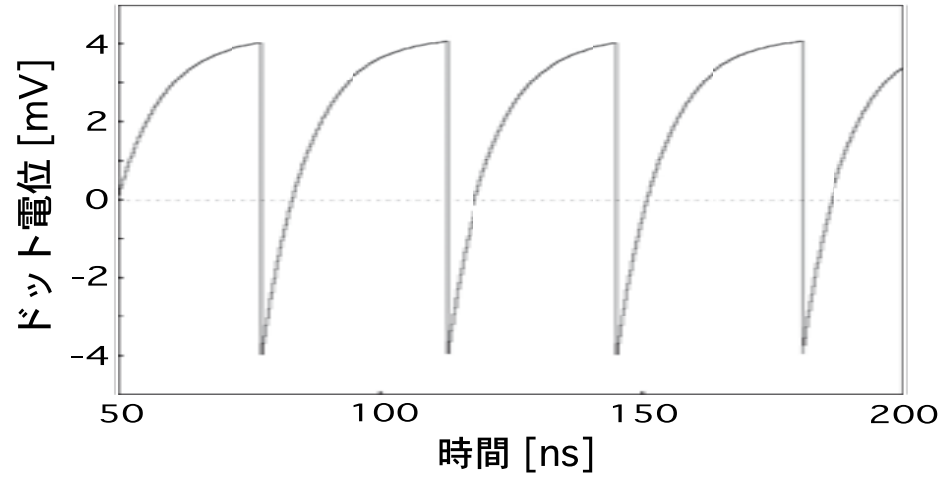
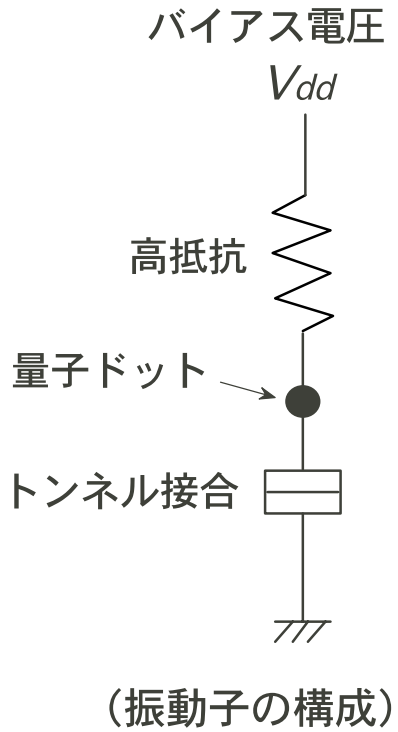
量子ドットの**単電子輸送**



非線形振動 の発生

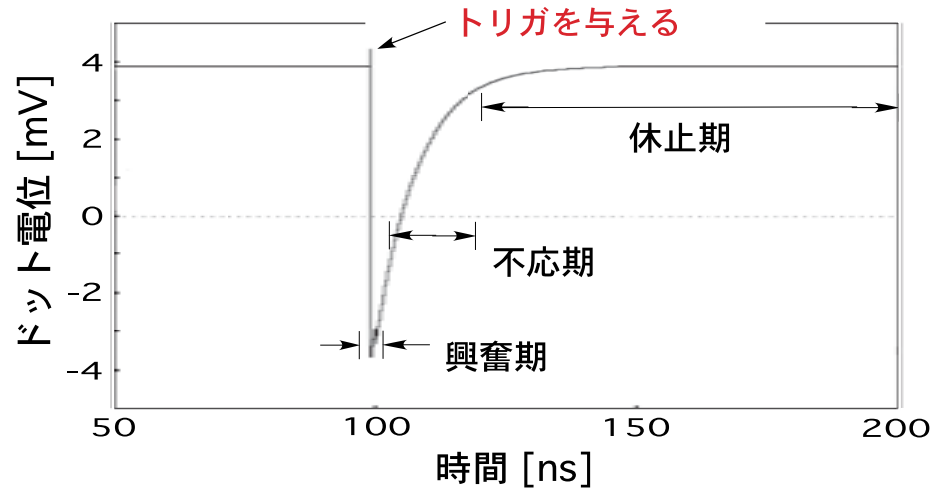
単電子回路による非線形振動子

クーロンブロックードにもとづく単電子振動



(自励振動)

- ・トンネル接合の容量 = 20 aF
- ・トンネル抵抗 = 1 M Ω
- ・高抵抗 = 400 M Ω
- ・バイアス電圧 V_{dd} = 4.2 mV

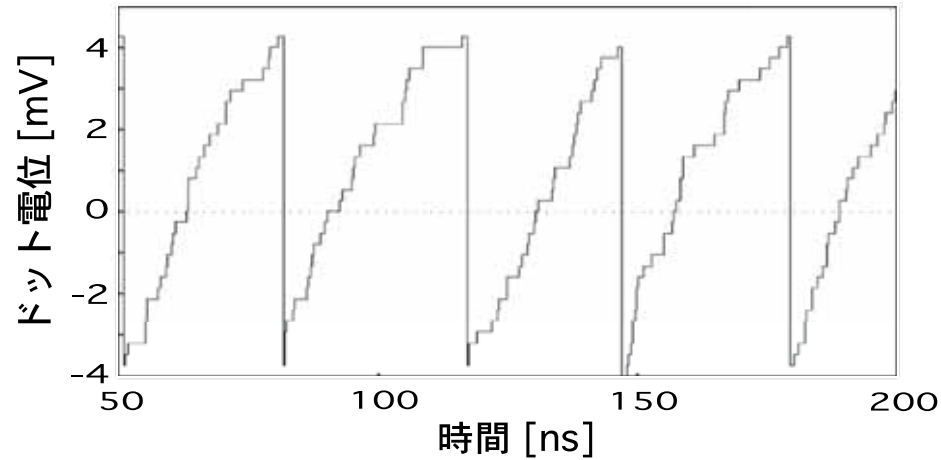
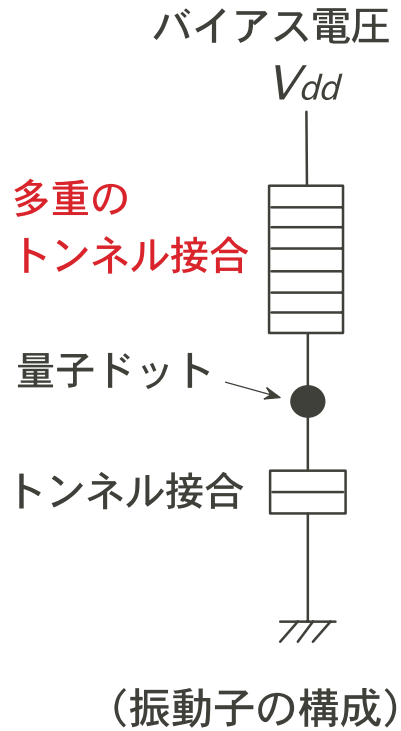


(単安定振動)

- ・トンネル接合の容量 = 20 aF
- ・トンネル抵抗 = 1 M Ω
- ・高抵抗 = 400 M Ω
- ・バイアス電圧 V_{dd} = 3.8 mV

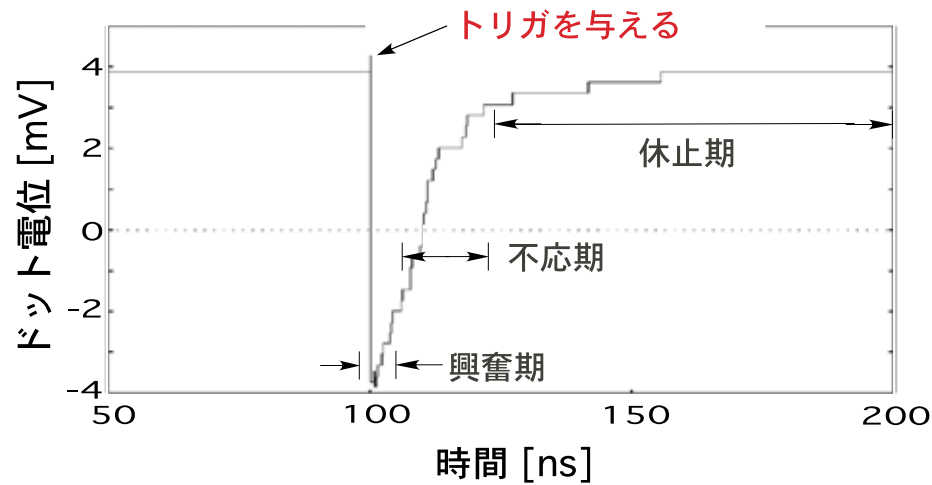
(いずれもシュミレーション)

多重トンネル接合による非線形振動子



(自励振動)

- ・トンネル接合の容量 = 10 aF
- ・トンネル抵抗 = 1 M Ω
- ・多重接合の各容量 = 300 aF
- ・多重接合の各抵抗 = 20 M Ω
- ・多重の個数 = 30
- ・バイアス電圧 V_{dd} = 8.5 mV



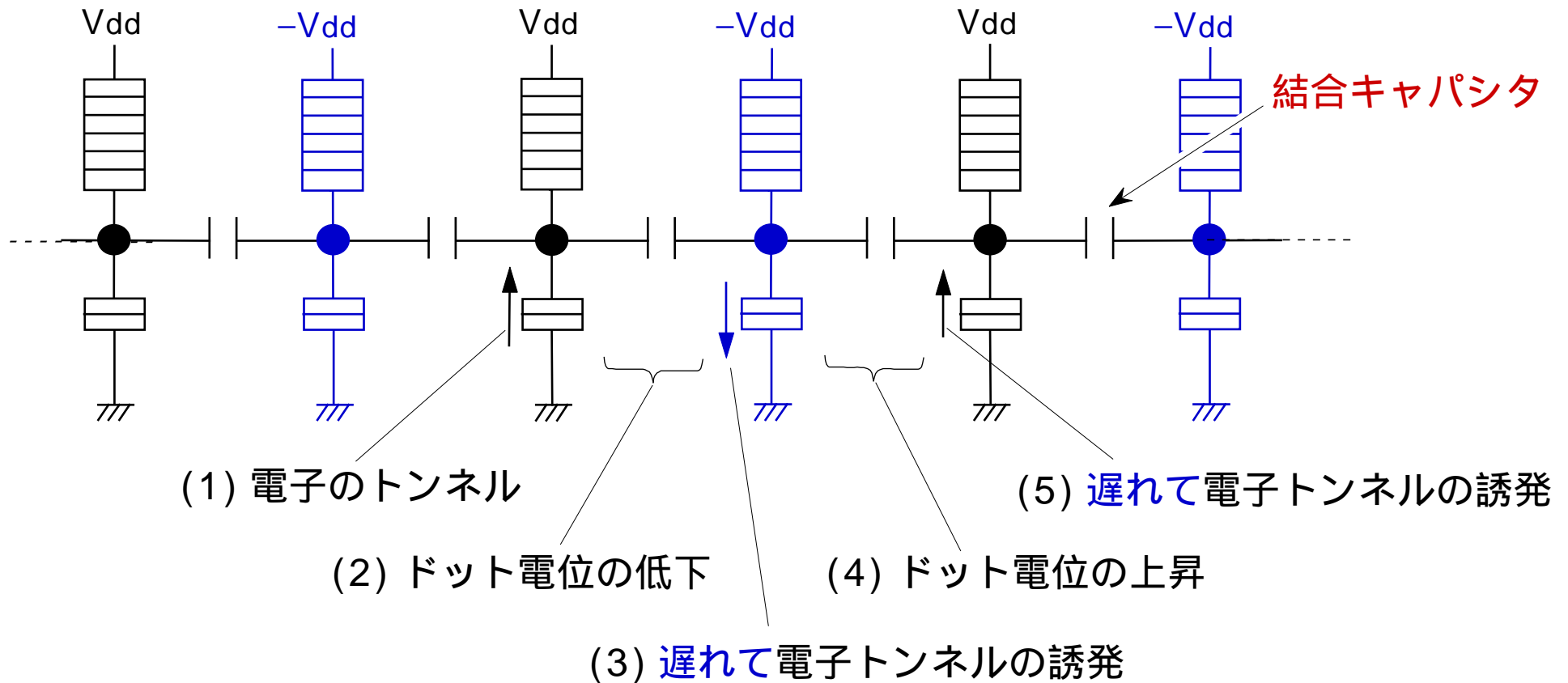
(単安定振動)

- ・トンネル接合の容量 = 10 aF
- ・トンネル抵抗 = 1 M Ω
- ・多重接合の各容量 = 300 aF
- ・多重接合の各抵抗 = 20 M Ω
- ・多重の個数 = 30
- ・バイアス電圧 V_{dd} = 7.8 mV

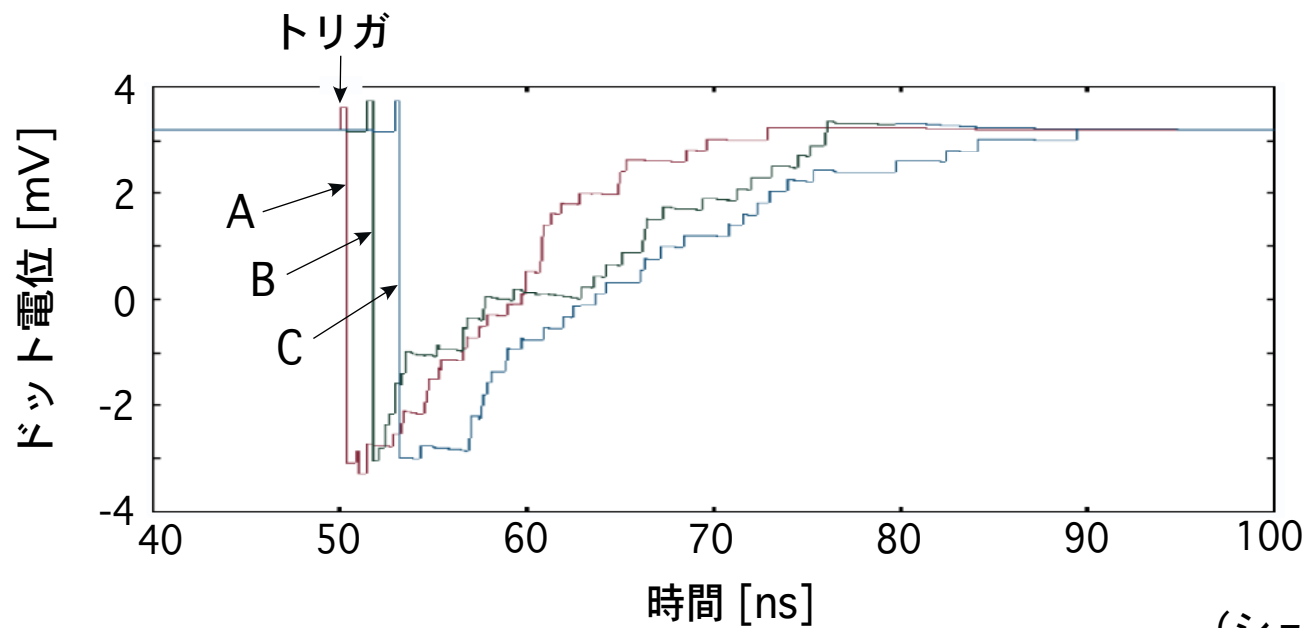
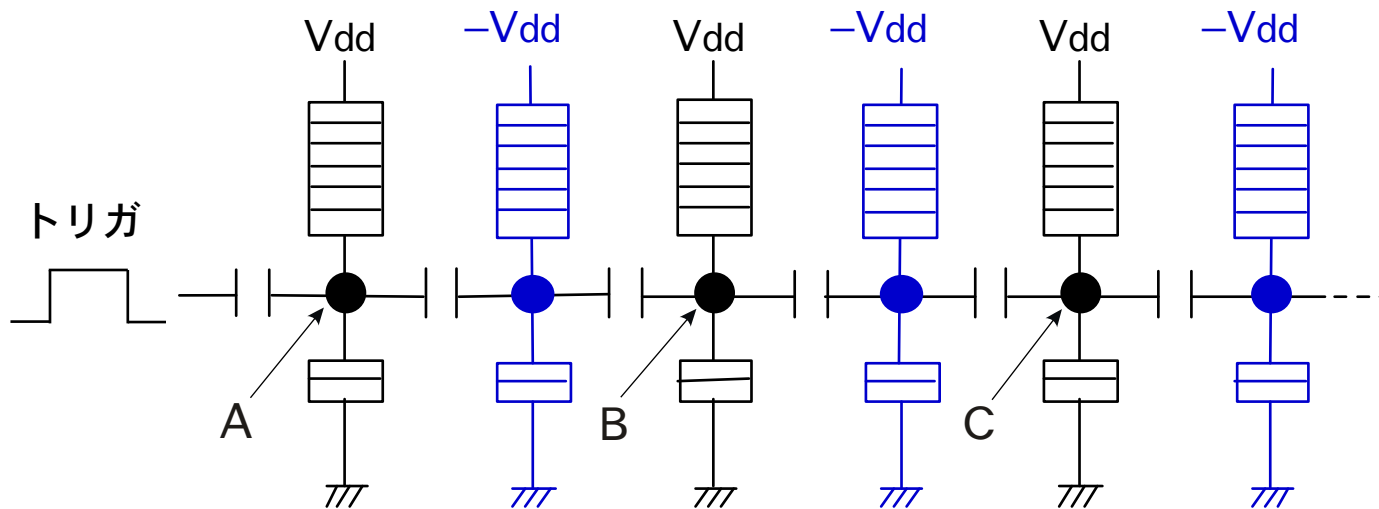
(いずれもシュミレーション)

どのようにして "拡散的" な相互作用を実現するか

- **キャパシタ結合** による電圧の伝達
 - **トンネル待ち時間** の遅れ効果
- ⇒ **拡散** に類似した効果



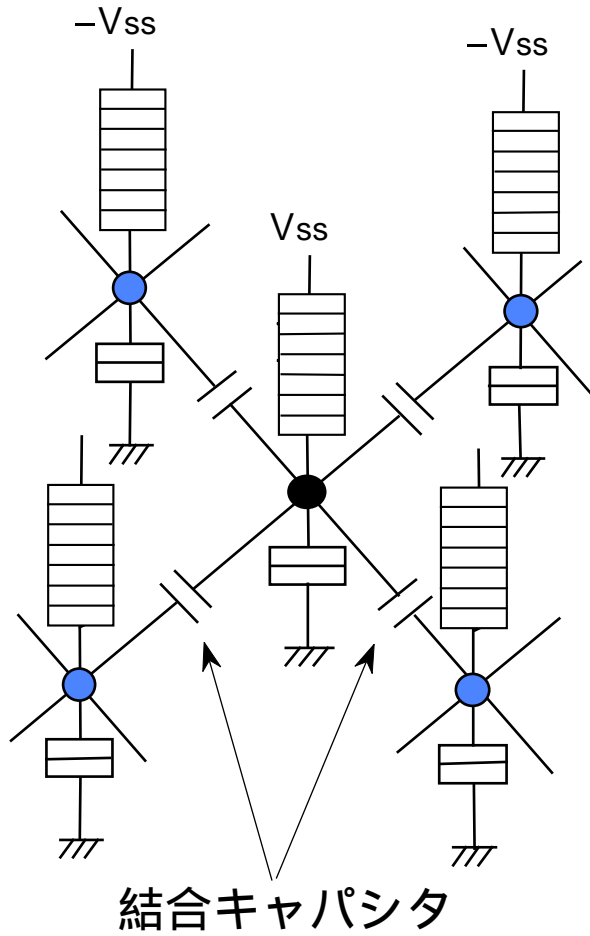
"拡散" による電子トンネルの伝搬



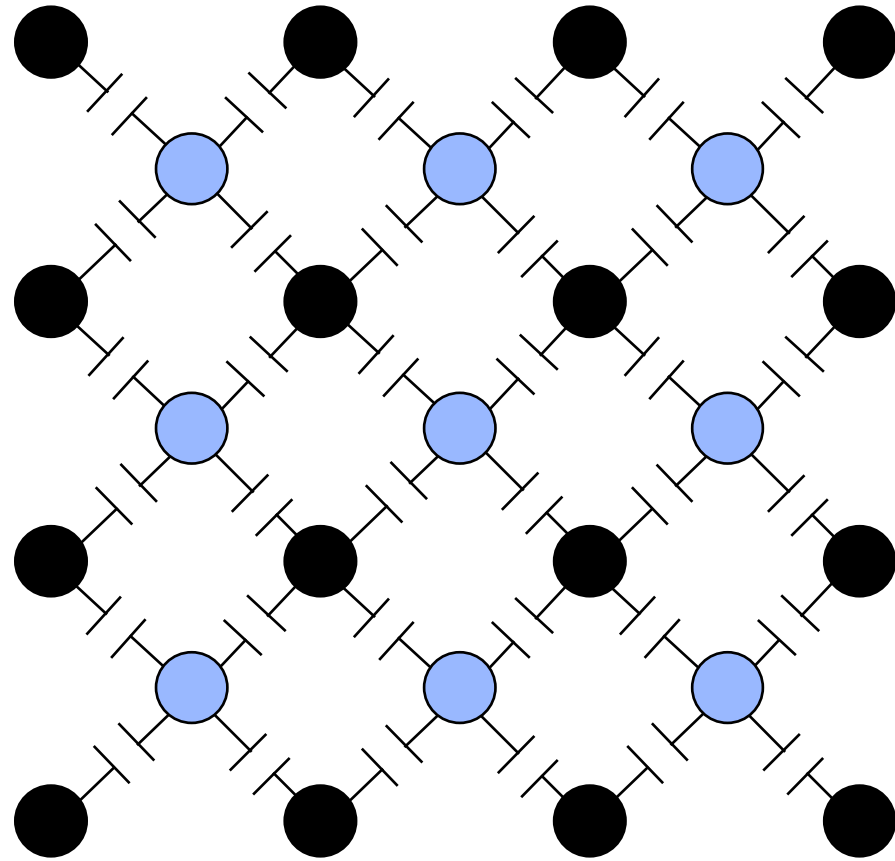
(シュミレーション)

単電子振動子の二次元ネットワーク

振動子の相互結合

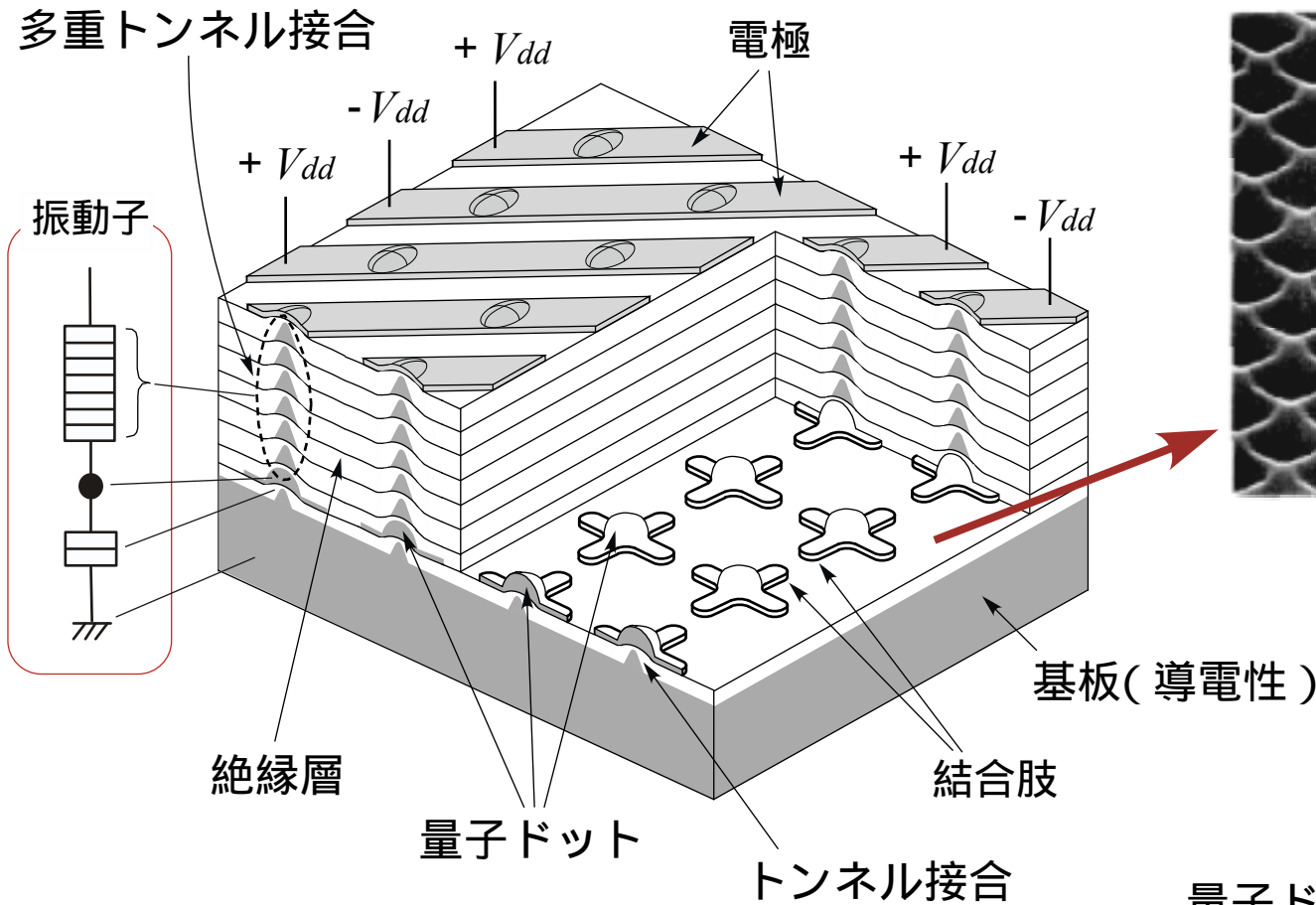


振動子ネットワーク



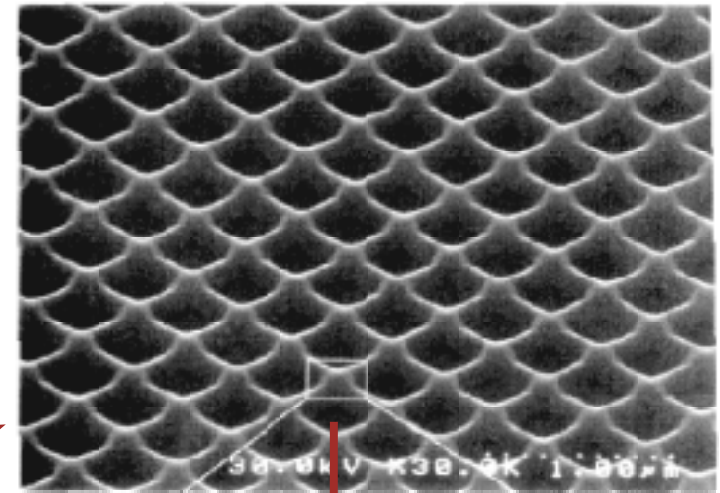
量子ドット反応拡散デバイスの構成

(デバイスの構造)



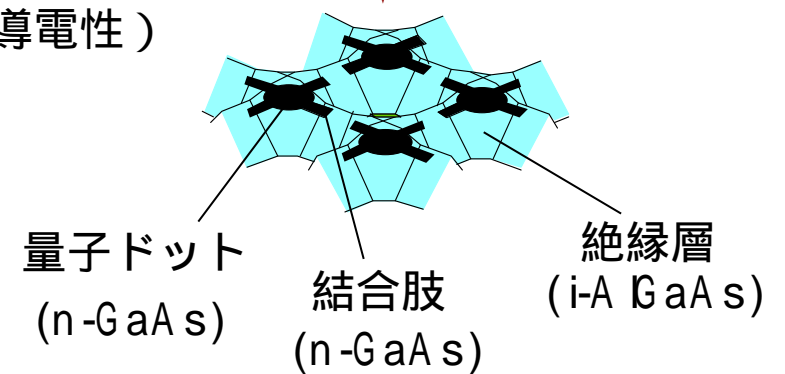
(量子ドットネットワーク)

(SEM 写真 : 配列ピッチ 400 nm)

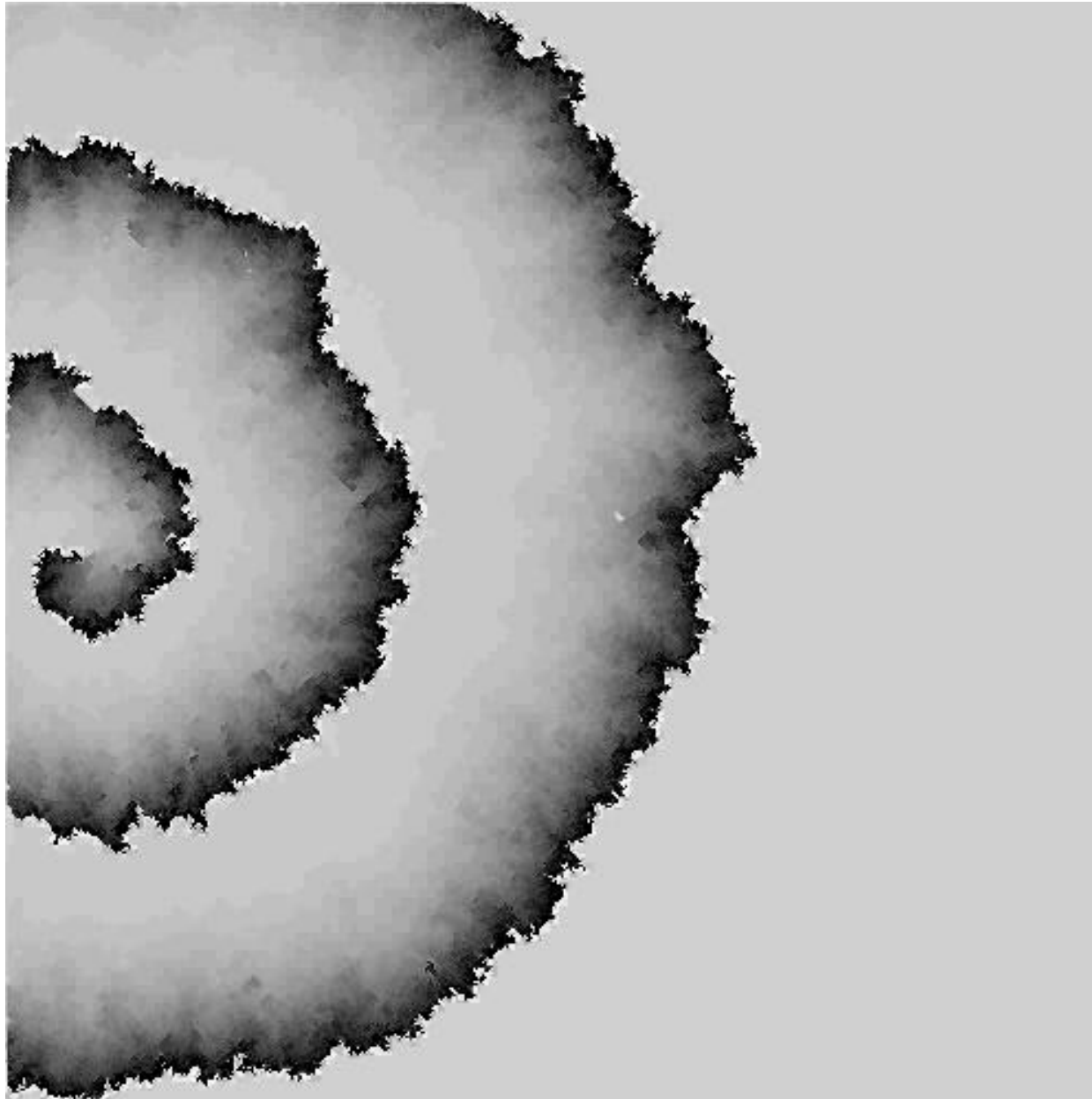


(北大-量子集積エレクトロニクス研究センター)

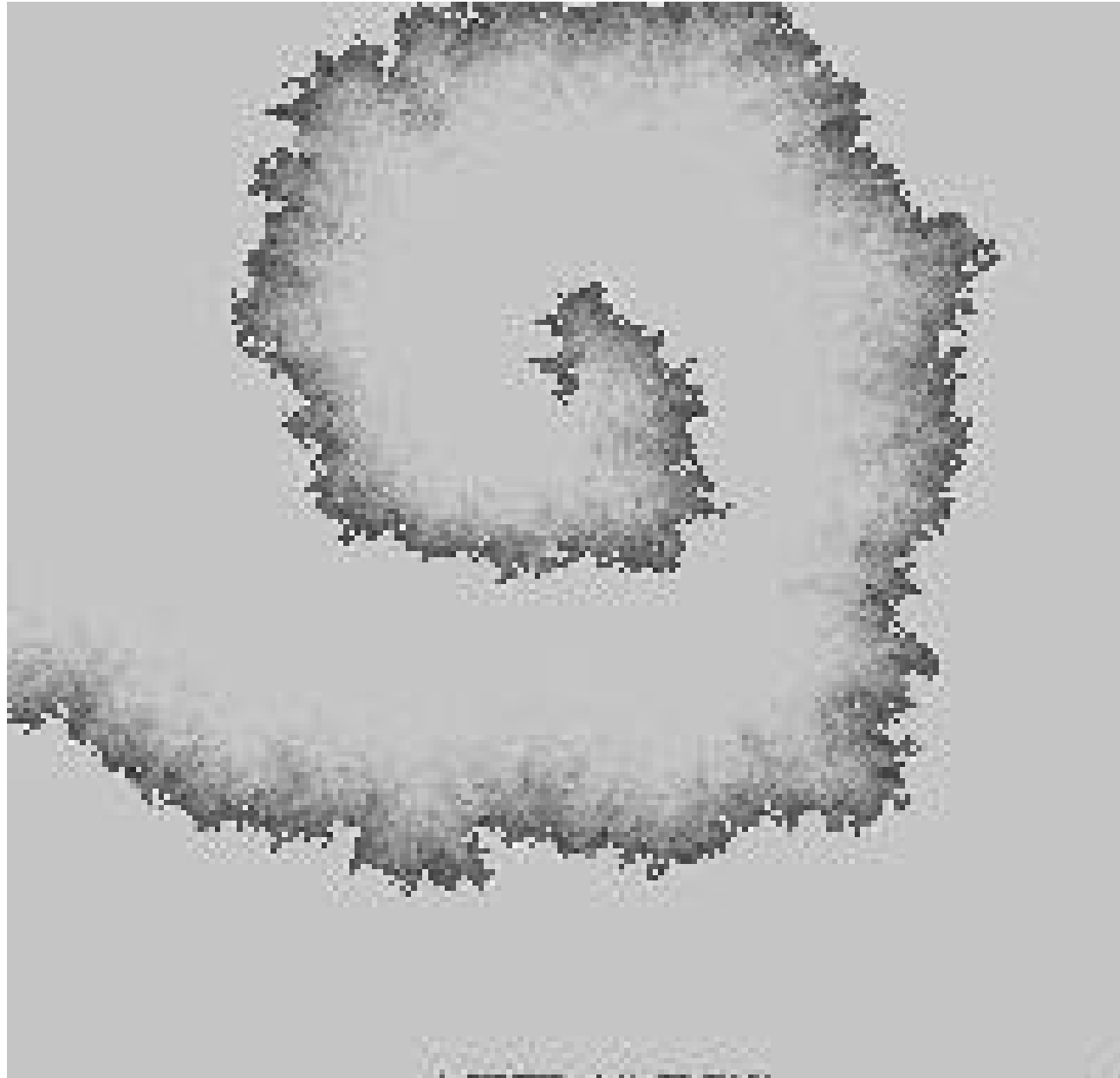
拡大



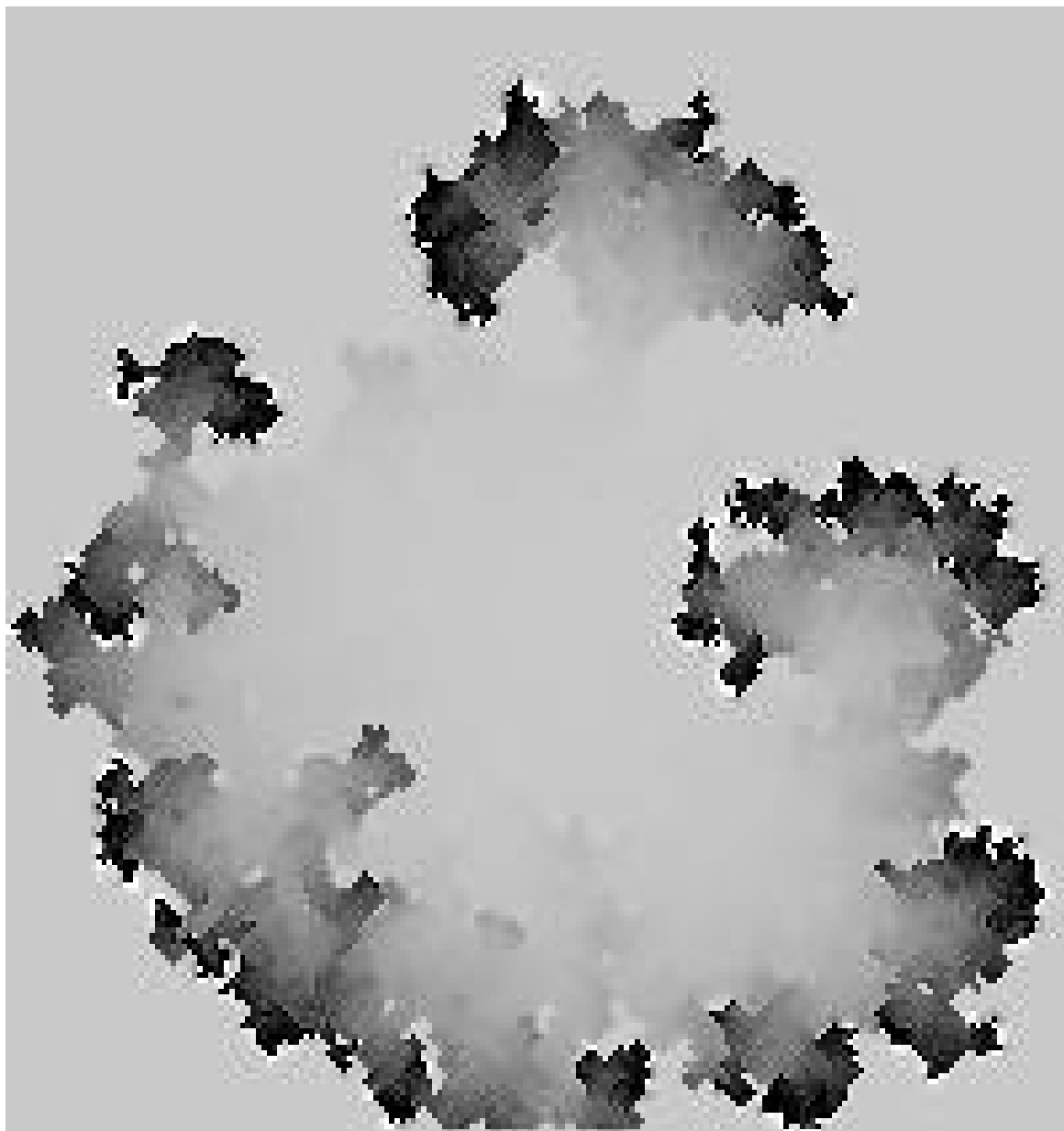
量子ドット 反応拡散系がつくる散逸構造（ラセンの成長）



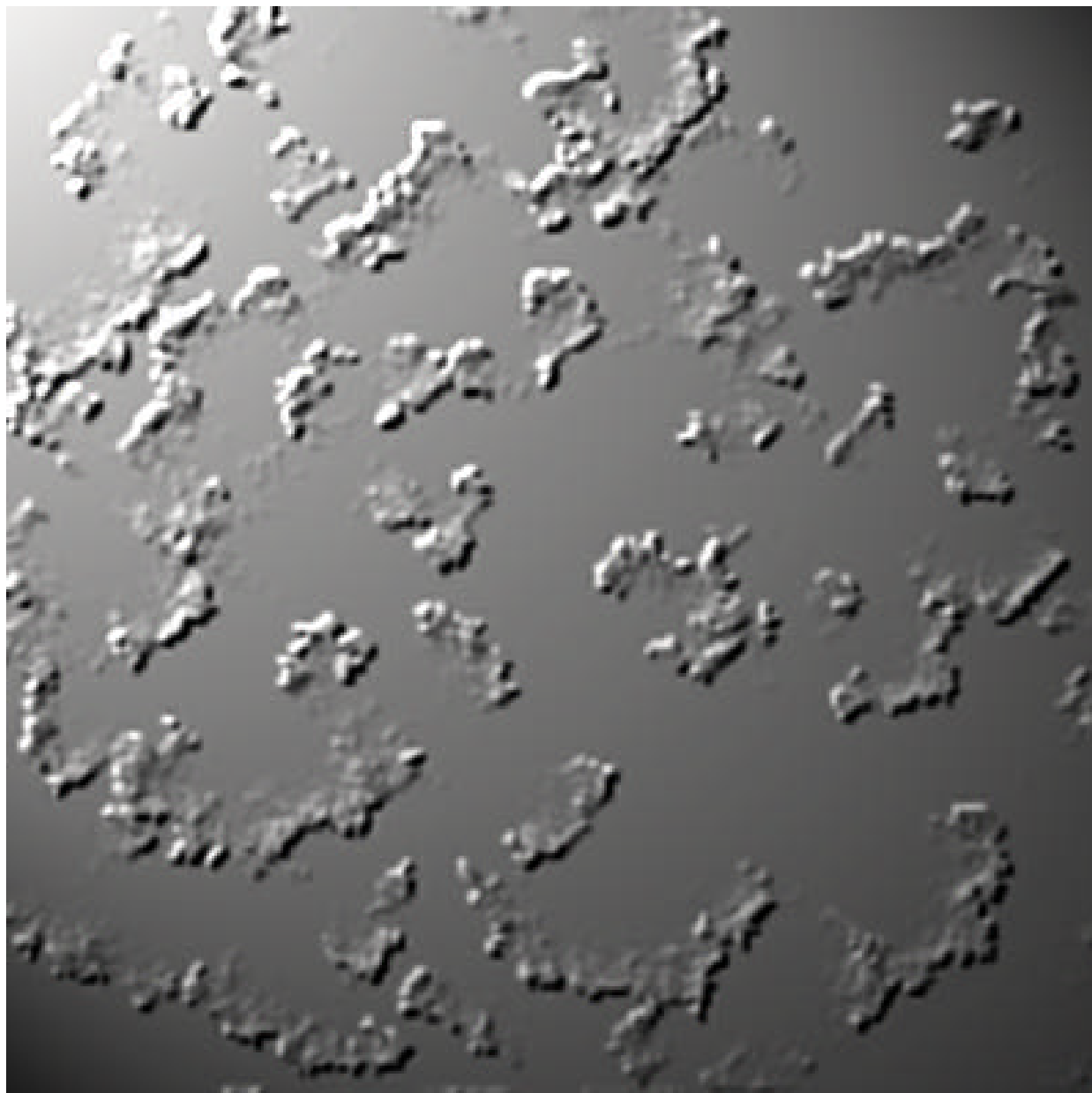
量子ドット 反応拡散系がつくる散逸構造（スピロヘータ）



量子ドット反応拡散系がつくる散逸構造（分裂と増殖）



量子ドット反応拡散系がつくる散逸構造（線虫の発生と繁殖）



これからの研究課題（その1：応用分野）

（生体の機能）

（電子デバイス化）

- 認識と判断 → 人工知能と脳型コンピュータ
- 視覚や聴覚 → インテリジェントセンサ
- **生物が生き生きしていること**
→ 応用分野？

「自己組織化とホメオスターシス」

の機能を模擬した柔軟な制御システム

これからの研究課題（その2：多媒体システムの開拓）

複雑で高度なダイナミクス
電子的な擬似生命をつくる

⇒ 多くの変数

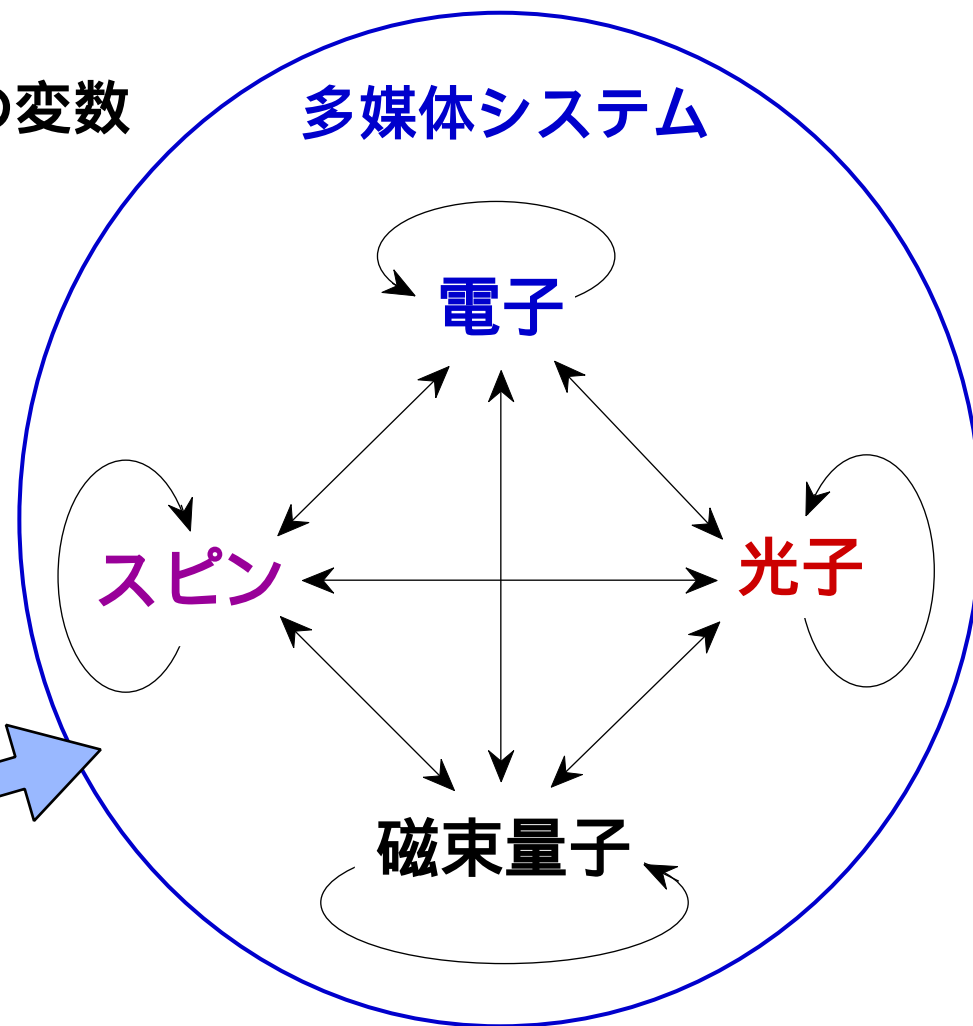
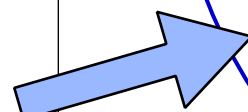
利用できる変数媒体は？

化学的な反応拡散系

有機物 = 100 万種

電子的な反応拡散系では

電子, 光子, スピン, 磁束量子,



今後の課題：異種の媒体間で生じる新しい物理現象の探索