

# 貝殻・真珠の骨組み形成の メカニズム

長澤 寛道

東京大学・大学院農学生命科学研究科・  
応用生命化学専攻・生物有機化学研究室

‡:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。

# 内 容

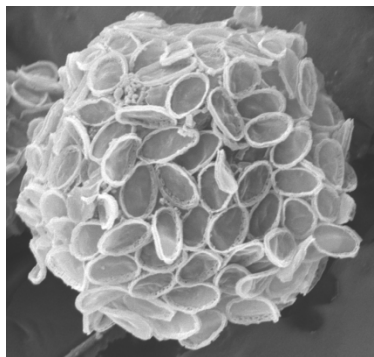
1. 真珠形成はバイオミネラリゼーションの一つ
2. 真珠と貝殻の真珠層は同じ作られ方で作られる
3. 真珠はどのようにして作られるのか
4. バイオミネラリゼーションの応用の拡がり

# 内 容

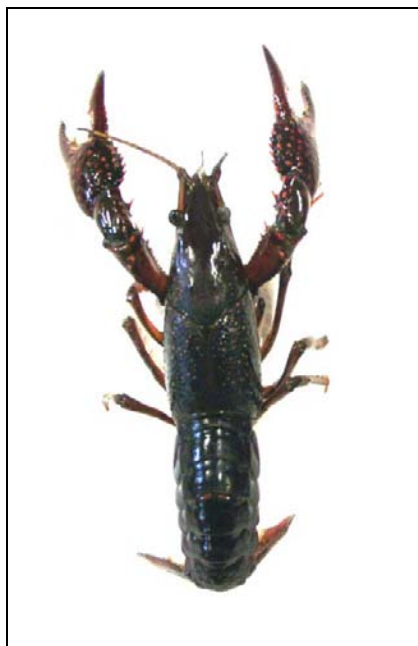
1. 真珠形成はバイオミネラリゼーションの一つ
2. 真珠と貝殻の真珠層は同じ作られ方で作られる
3. 真珠はどのようにして作られるのか
4. バイオミネラリゼーションの応用の拡がり

# バイオミネラリゼーション（生物が鉱物を作る作用）

下等な生物から高等植物・脊椎動物まで



円石藻類のココリス(炭酸カルシウム)



甲殻類の外骨格(炭酸カルシウム)



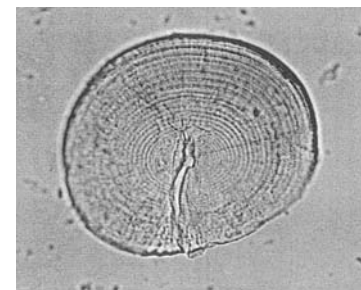
植物のオパール  
(ケイ酸)



魚類の鱗



軟体動物の貝殻および真珠(炭酸カルシウム)



魚類の耳石  
(炭酸カルシウム)

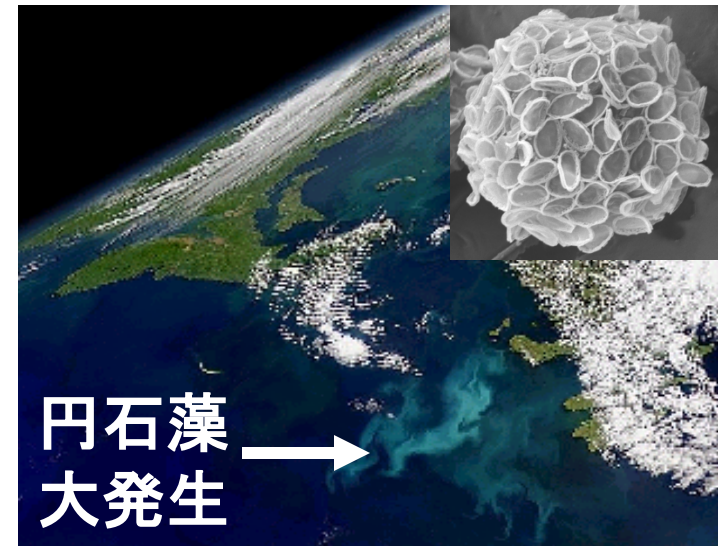
メカニズム？

# バイオミネラリゼーションとは

- ・ **日本発の和製英語** (1948年, **真珠の研究**)  
(biomineralization、生体鉱物化、生鉱物化)
- ・ 生物が関与しないで作られる鉱物との違い
  - 有機物を含む**
  - 機械強度が増す (約1000倍)
  - 可塑性が増す (しなやかさ)
- ・ 利用のされ方
  - 骨格 (生体の形態) の維持、生体防御、解毒、
  - 平衡感覚の維持、生体内カルシウムの貯蔵
- ・ 約6億年前に有殻生物の出現 (化石研究から)  
炭酸カルシウムバイオミネラリゼーション: CO<sub>2</sub> 固定  
$$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$$
  
石灰岩 (地球上の炭素の90%、生物遺体由来)  
固定量 : 5~10億トン/年  
大気CO<sub>2</sub>濃度: **97%** → **0.04%** (温室効果気体)



<http://darwin.ori.u-tokyo.ac.jp/watalab/wata2080081201.html>



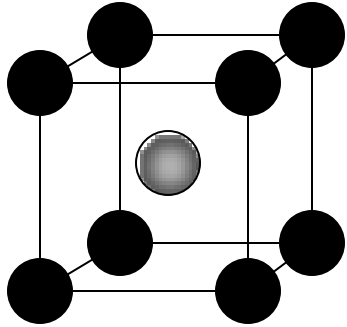
<http://www.soes.soton.ac.uk/staff/tt/>

# バイオミネラリゼーションのメカニズム

- ・微量に含まれる**有機基質がカギ**  
**部位、形態、時期、結晶方位、結晶多形等の制御**
- ・細胞内外の閉じられた空間に作られる
  - ・閉じられた空間内で**過飽和状態**を作り出す
  - ・細胞内：円石藻のココリス
  - ・細胞外：貝殻、耳石、甲殻類の外骨格、サンゴ
- ・有機基質含量：1～30%
  - ・有機基質の存在様式：結晶内、結晶間



# 炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) の結晶多形



結晶多形: 同じ組成をもつが、原子の空間的配置が異なる結晶同士

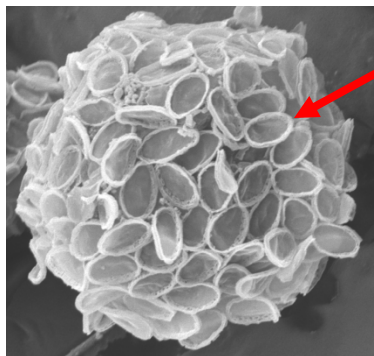
- ・カルサイト 円石藻のココリス、アコヤガイの稜柱層
- ・アラゴナイト 魚類の耳石(扁平石)、アコヤガイの真珠層
- ・ファーテライト 魚類の耳石(星状石)
- ・非晶質 甲殻類の外骨格

(安定性) カルサイト > アラゴナイト > ファーテライト > 非晶質

生物・組織は結晶多形を選択する一有機物が関与

# 炭酸カルシウムの結晶多形の生物による選択

カルサイト



円石藻類のココリス(炭酸カルシウム)



甲殻類の外骨格(炭酸カルシウム)



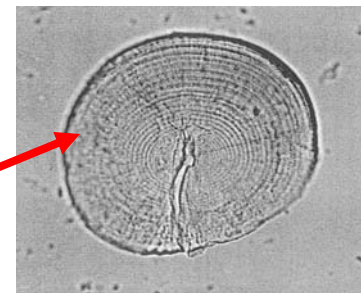
イネ

植物のオパール  
(ケイ酸)

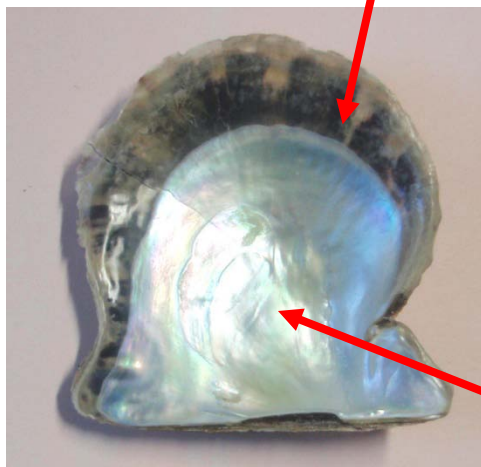
(リン酸カルシウム)



魚類の鱗



魚類の耳石  
(炭酸カルシウム)



軟体動物の貝殻(炭酸カルシウム)



非晶質

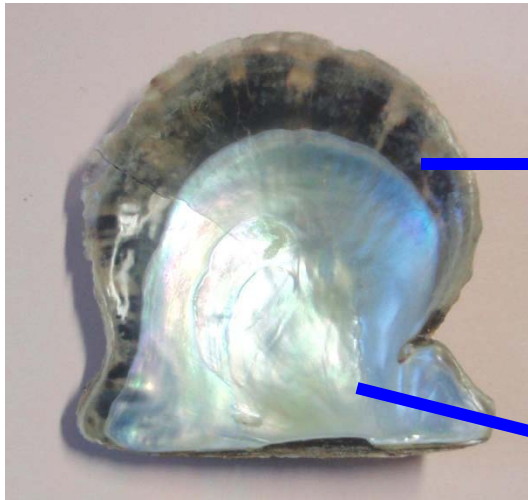
アラゴナイト



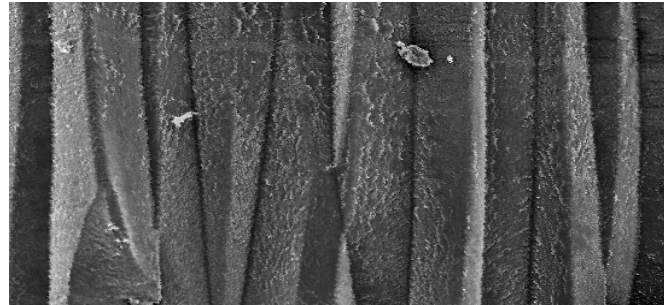
# 内 容

1. 真珠形成はバイオミネラリゼーションの一つ
- 2. 真珠と貝殻の真珠層は同じ作られ方で作られる**
3. 真珠はどのようにして作られるのか
4. バイオミネラリゼーションの応用の拡がり

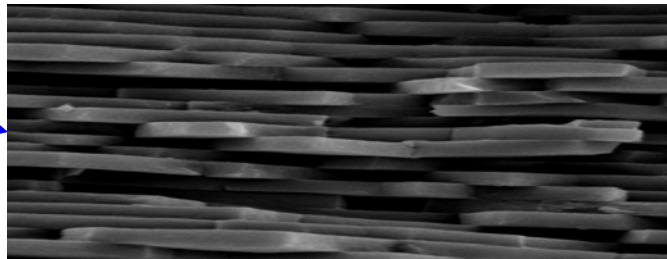
# アコヤガイの貝殻の構造



アコヤガイ (*Pinctada fucata*)

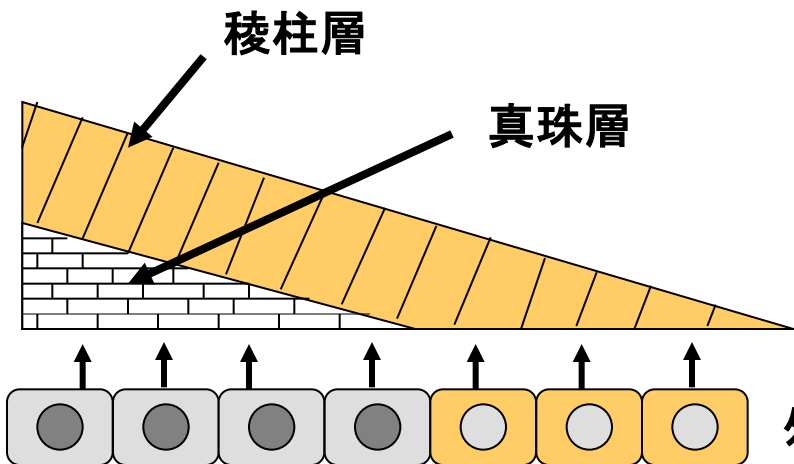


稜柱層  
(カルサイト)



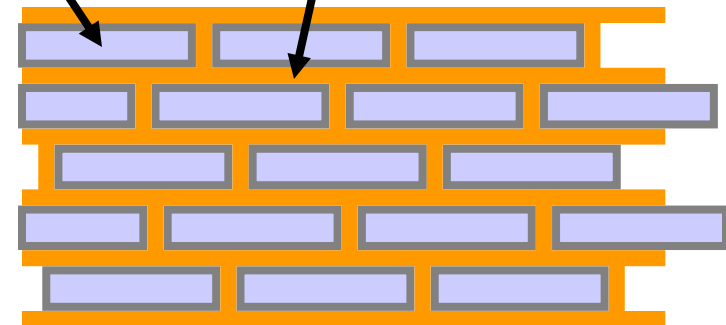
真珠層  
(アラゴナイト)

(断面)

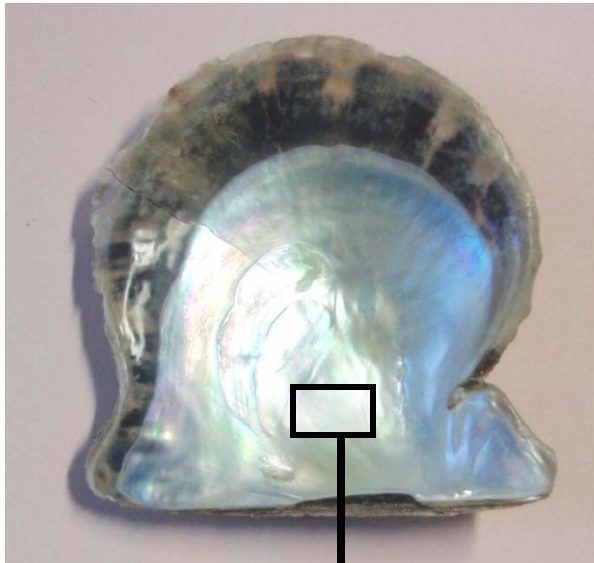


アラゴナイト  
結晶

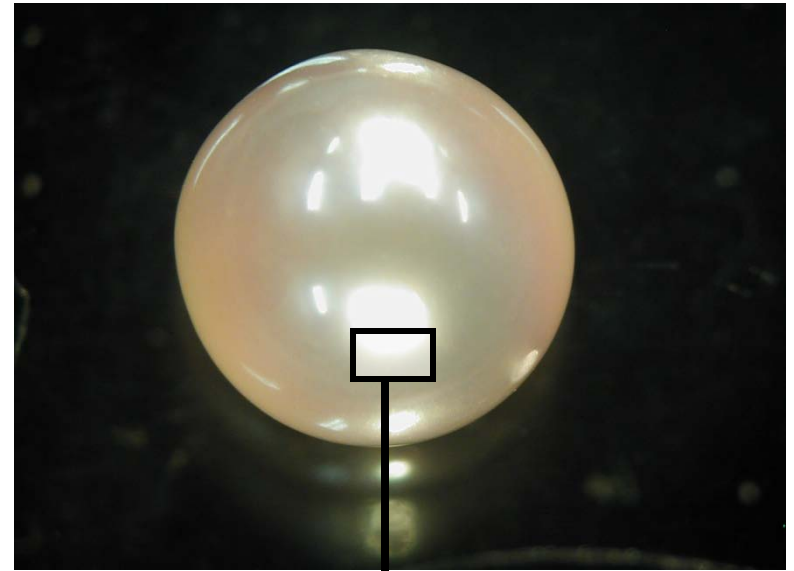
キチンタンパク質  
複合体



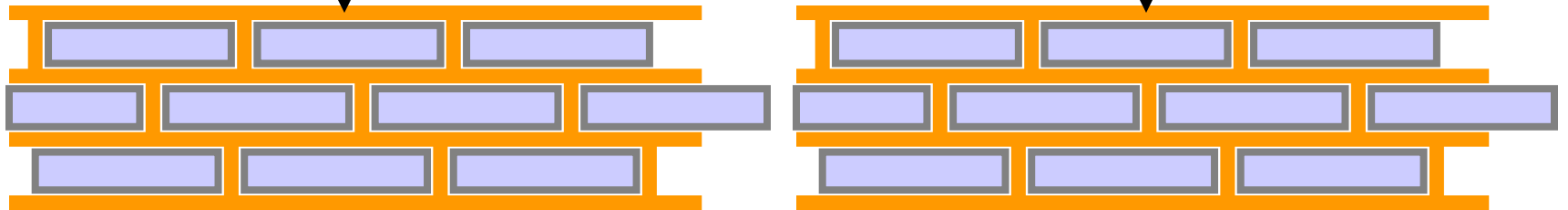
# 貝殻真珠層と真珠は同じ物理構造をもっている



真珠層

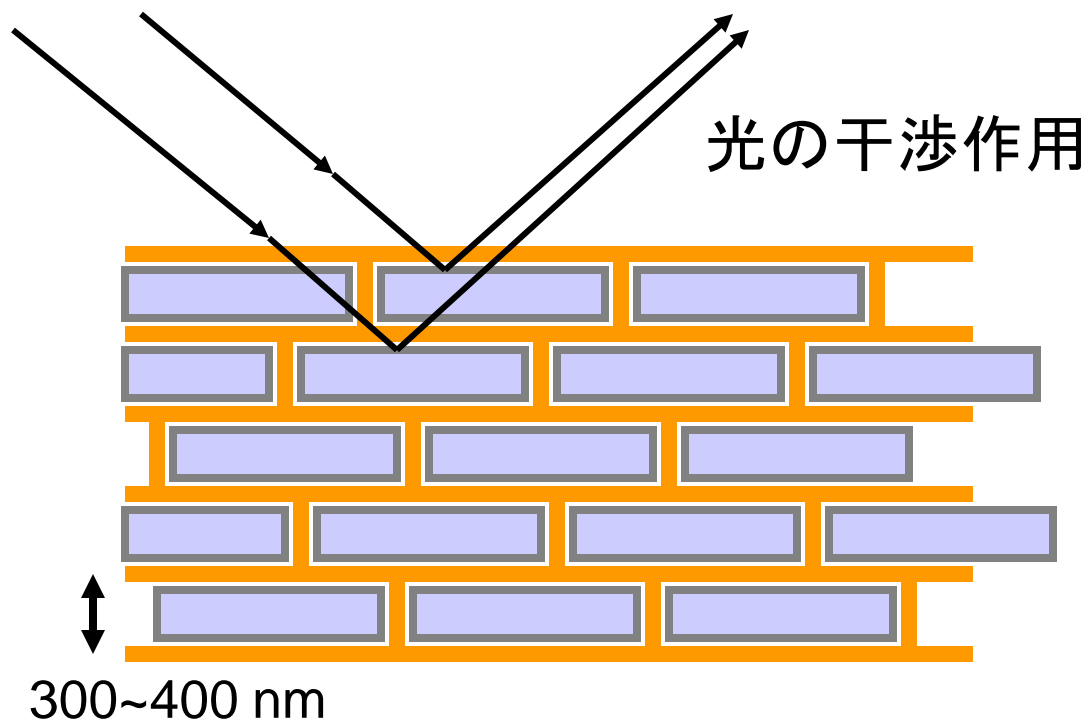


真珠



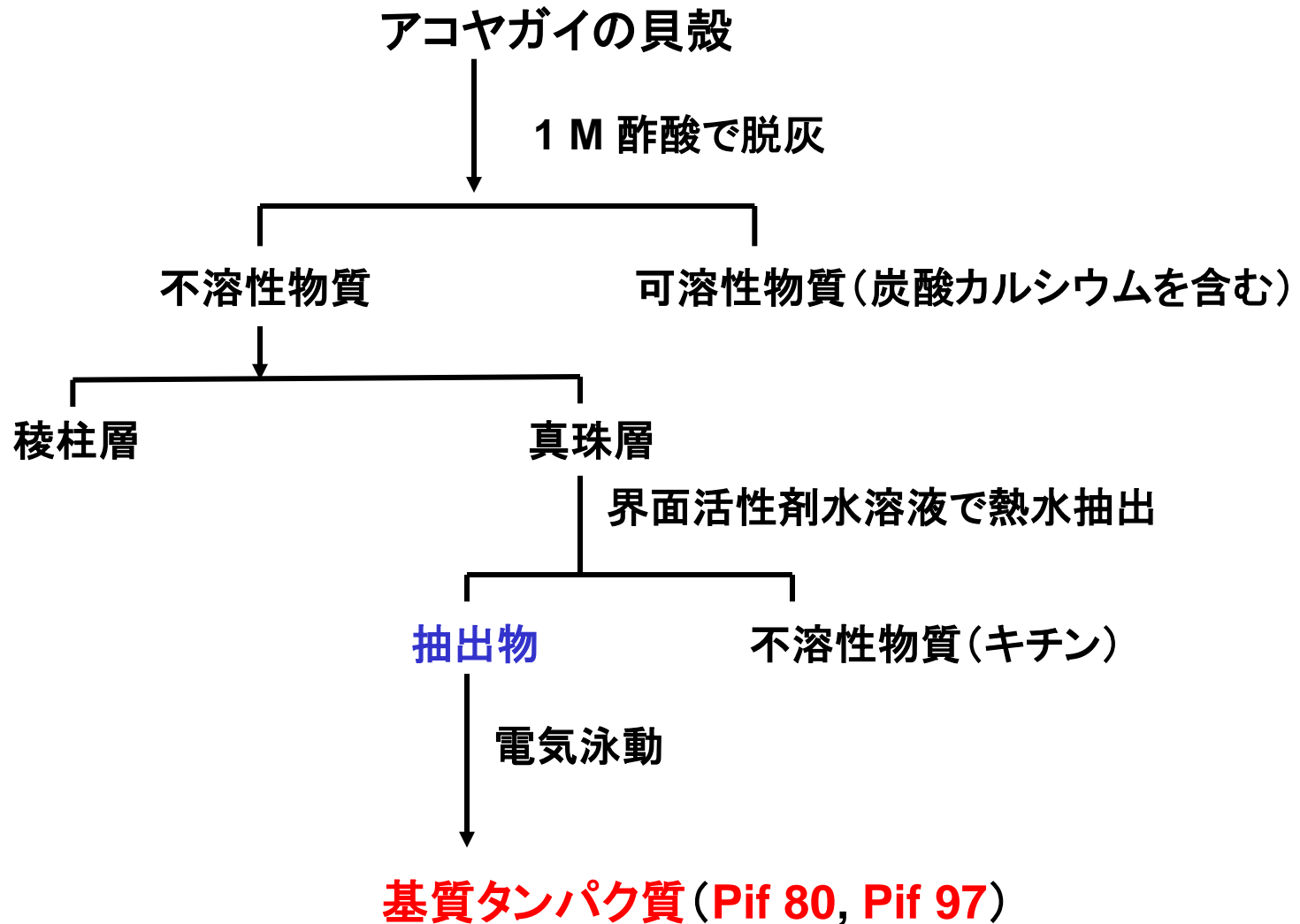
同じ物理構造

# 真珠の光沢は構造色による



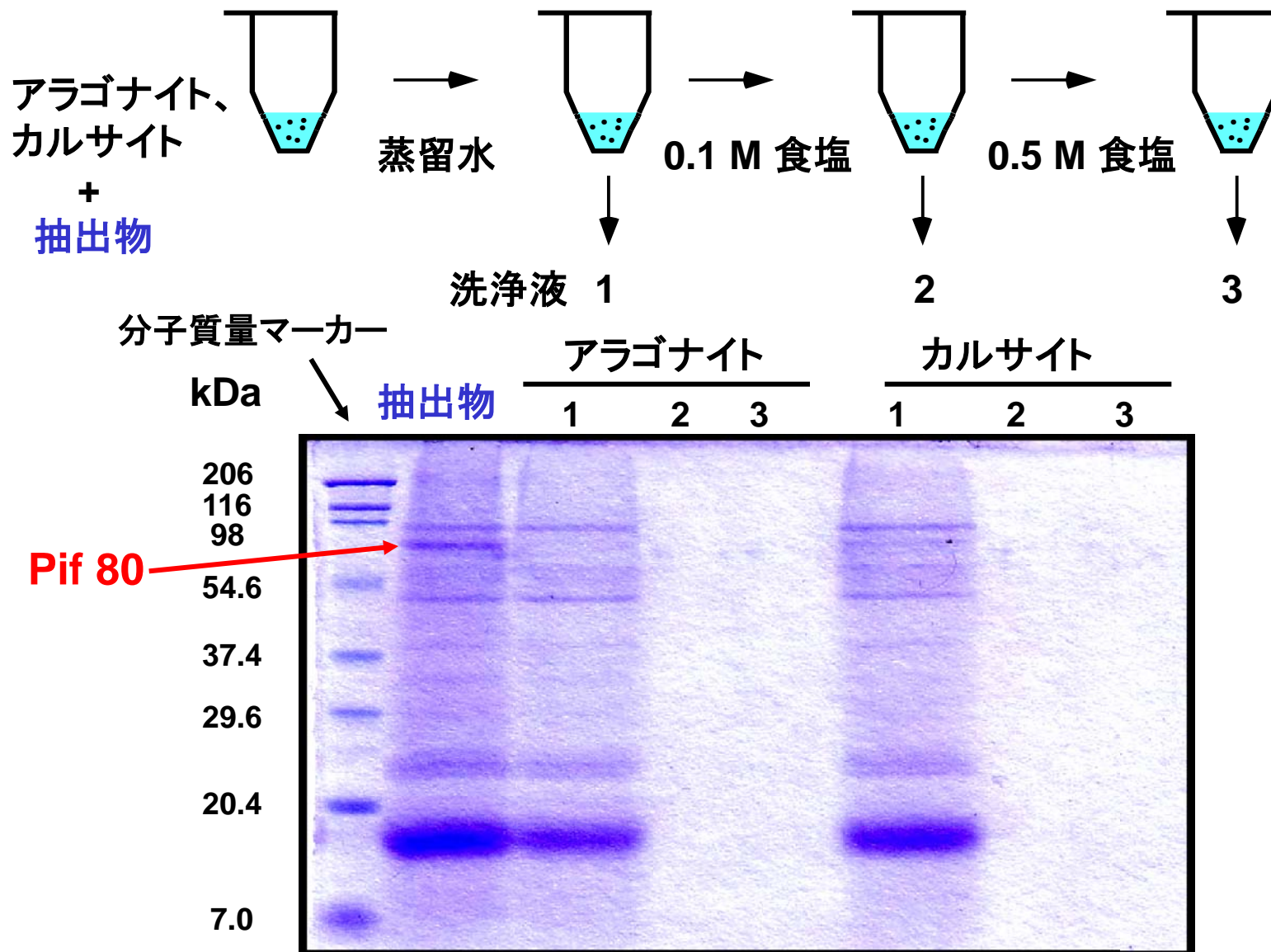
色調は色素による

# アコヤガイの貝殻から基質タンパク質の同定 (アラゴナイト誘導物質の探索: 50年来の課題)

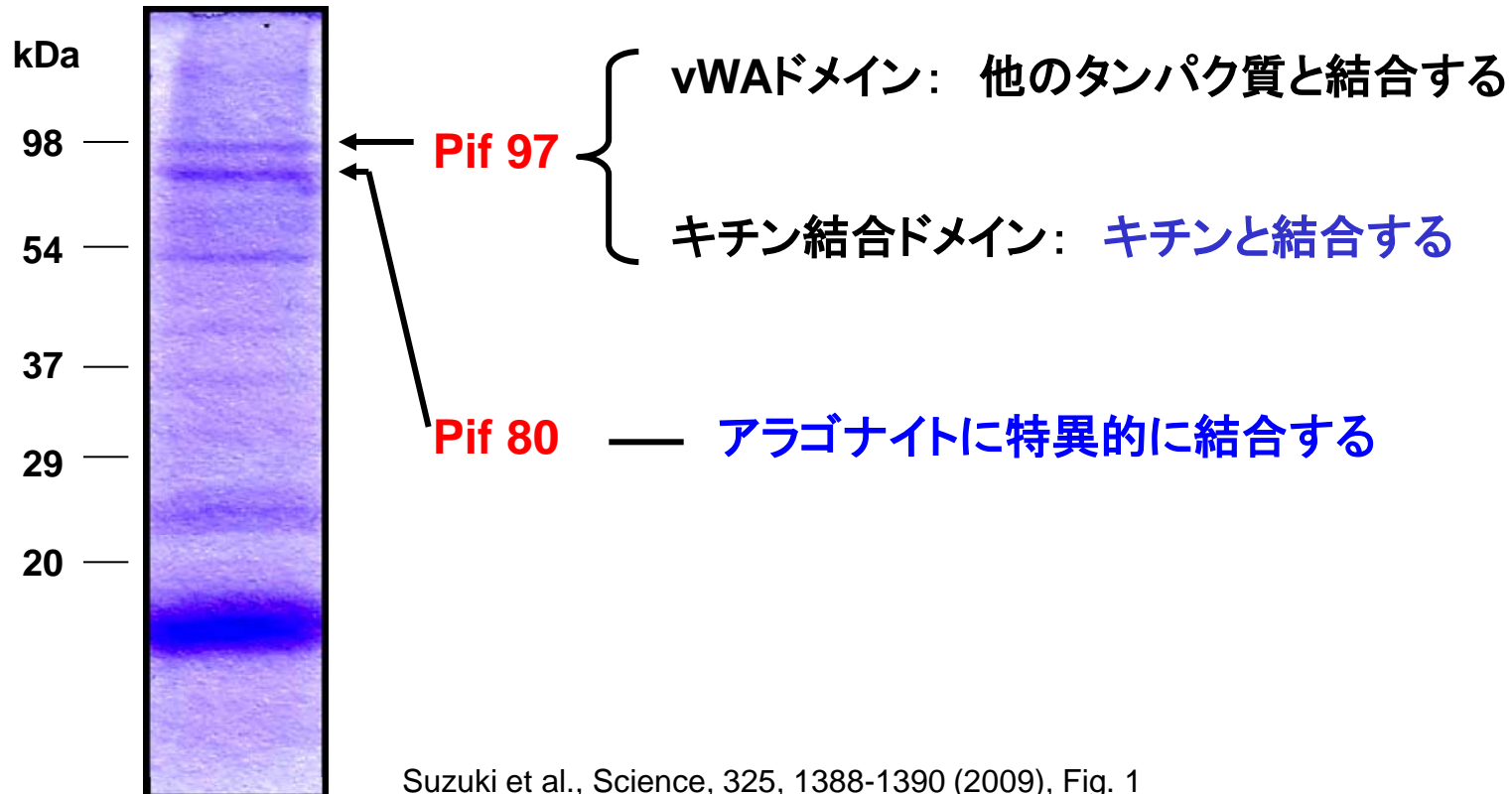
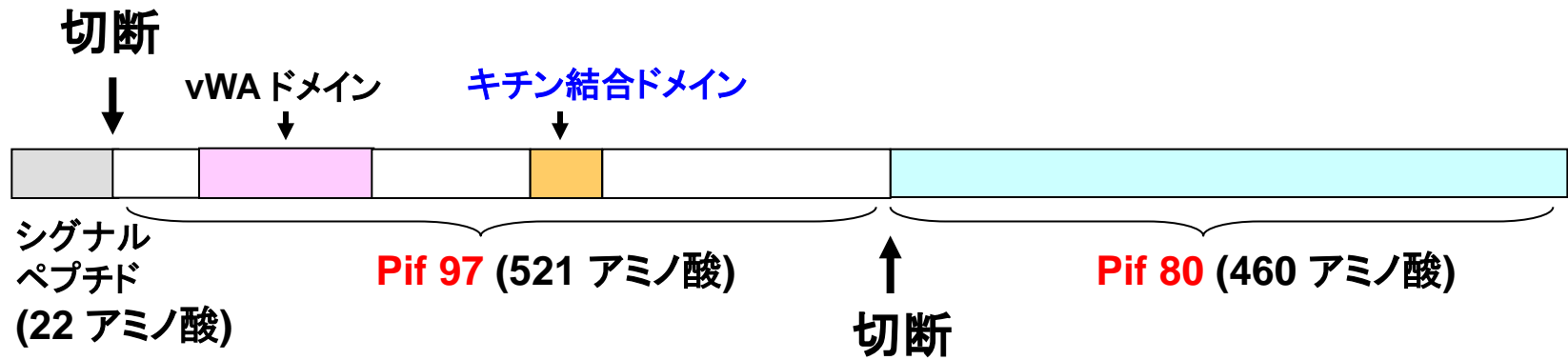




# アラゴナイトに特異的に結合する基質タンパク質の探索

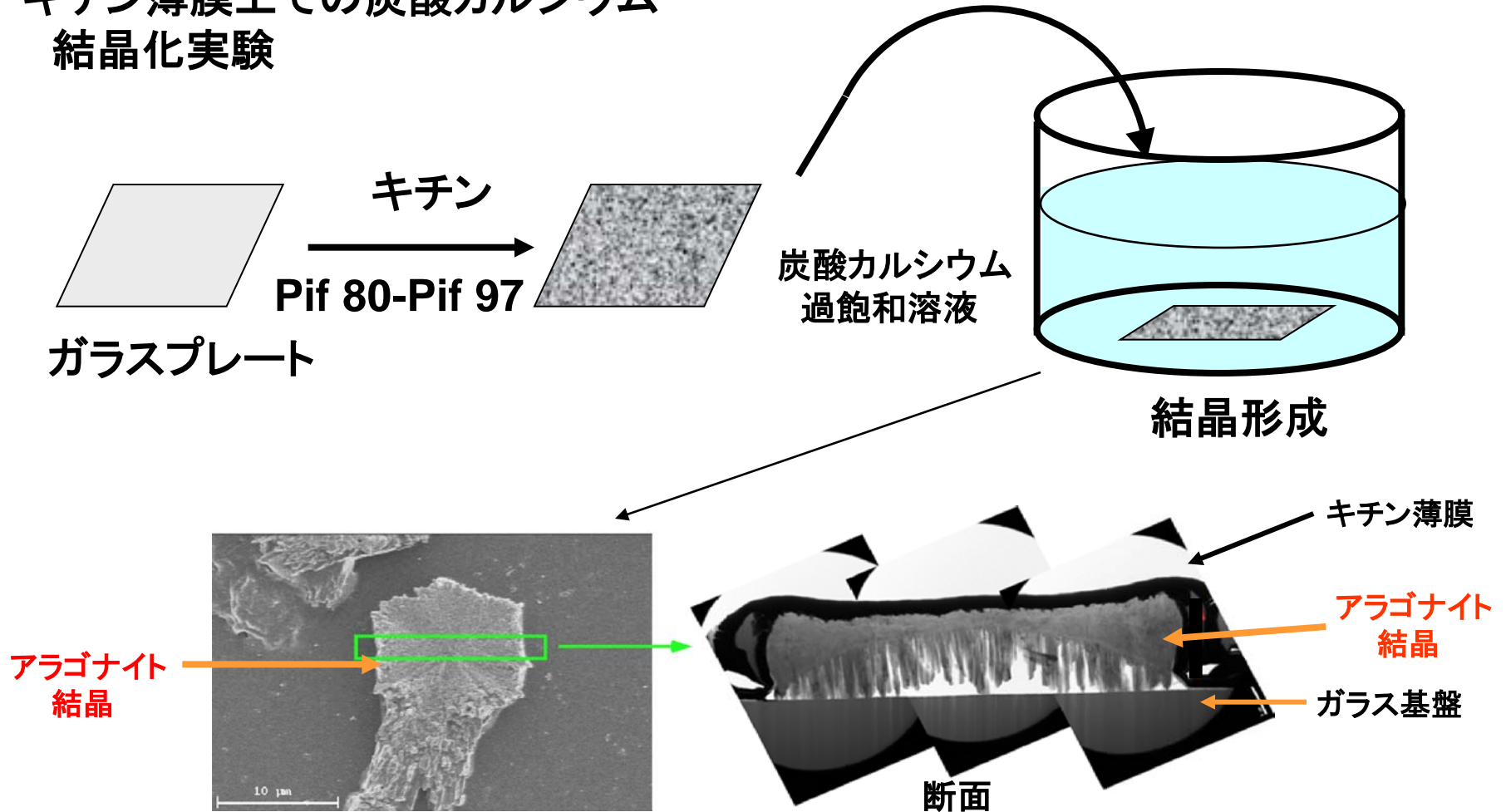


# Pif 80の前駆体の構造



# Pif 80・Pif 97 複合体のアラゴナイト誘導活性

キチン薄膜上での炭酸カルシウム  
結晶化実験



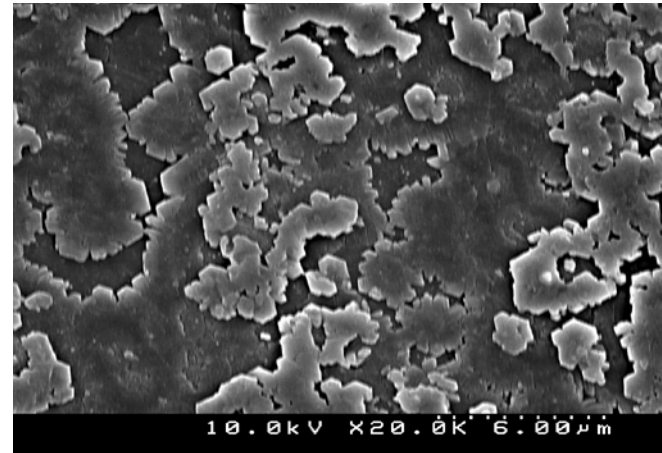
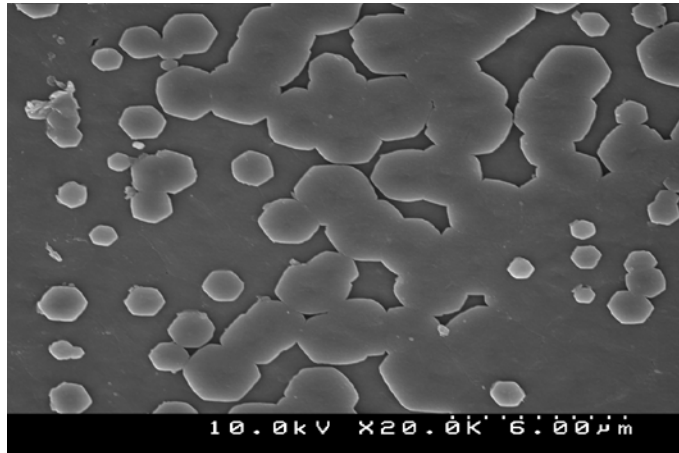
# Pif のRNA干渉の真珠層形態に及ぼす効果

(Pif タンパク質の合成量を抑制)

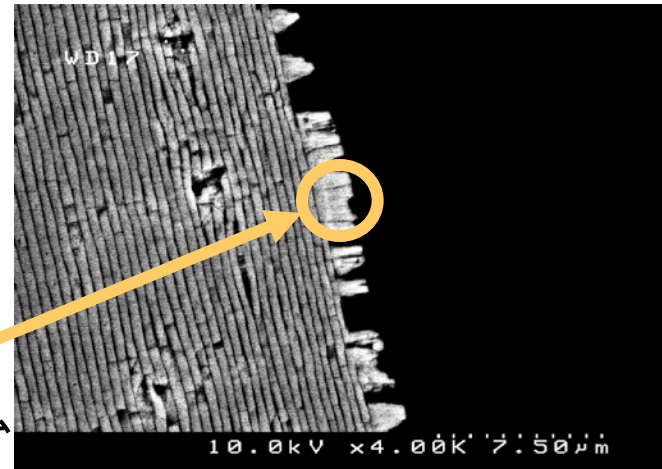
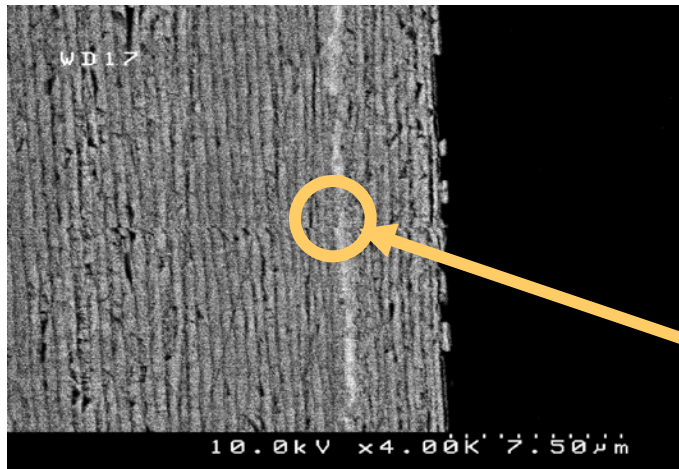
対照

Pifタンパク質量を抑制

表面



断面



Sr  
ストロンチウム

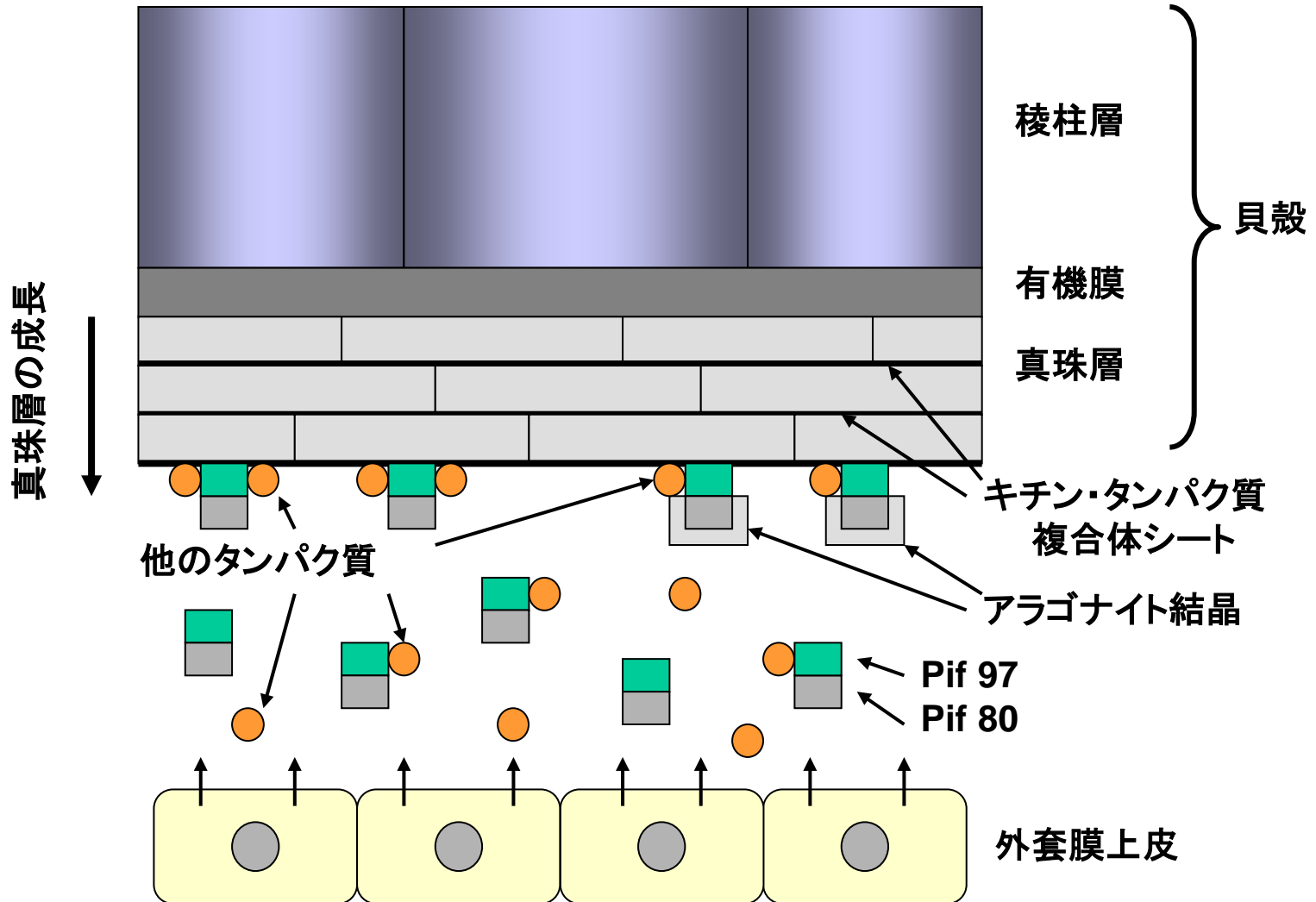
# Pif 80・Pif 97の役割

1. アラゴナイト結晶を誘導する
2. キチンと結合して有機膜を形成する

→ **真珠層形成に必須**



# 真珠層形成のメカニズム



# 内 容

1. 真珠形成はバイオミネラリゼーションの一つ
2. 真珠と貝殻の真珠層は同じ作られ方で作られる
- 3. 真珠はどのようにして作られるのか**
4. バイオミネラリゼーションの応用の拡がり

# 養殖真円真珠の歴史

- 1890 第3回内国産業博覧会で、**箕作佳吉**（東大教授）が**御木本幸吉**に養殖を勧めた。
- 1893 シカゴ世界博覧会に御木本が養殖半円真珠を出品。立案者として、箕作が博覧会から表彰。

著作権上の都合によりここに挿入されていた図表は削除致しました

## 西川藤吉（箕作の弟子）

- 1897 東京大学卒業、水産調査所技手
- 1899 農商務省技師（真珠の研究を開始）
- 1903 御木本の次女と結婚
- 1905 同休職、東京大学研究生（動物学教室）  
三崎臨海実験所、淡路福良湾で真円真珠の作製の研究
- 1907 真珠形成法の発明の特許出願「**ピース式**」
- 1908 真珠養殖研究を大学の事業として展開。**藤田輔世**、**昌世**兄弟が協力
- 1909 胃癌のため逝去

著作権上の都合によりここに挿入されていた図表は削除致しました

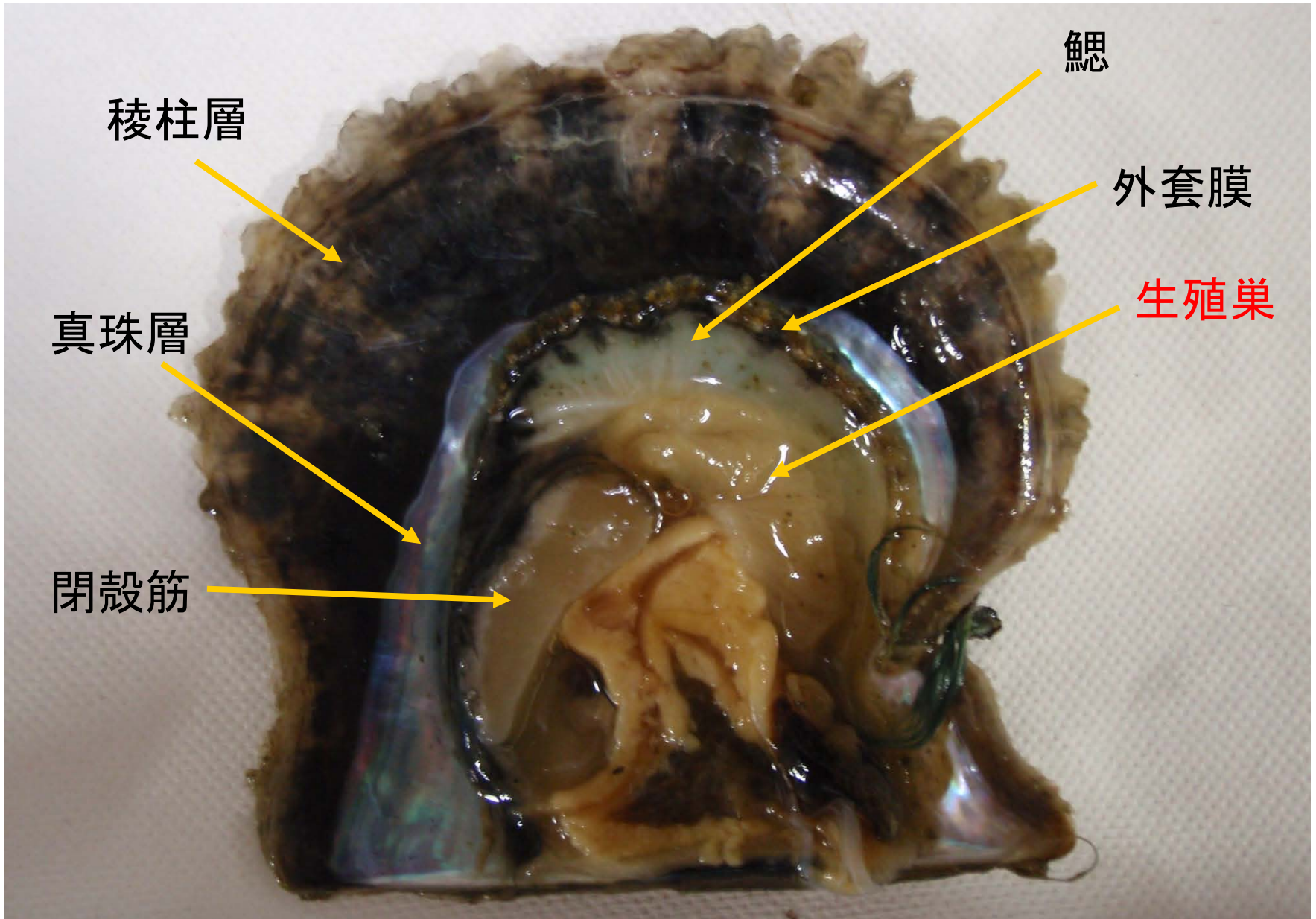
箕作佳吉

**藤田輔世**: セレベスのプートン島で真珠養殖に成功。琵琶湖で淡水真珠の養殖に世界で初めて成功。

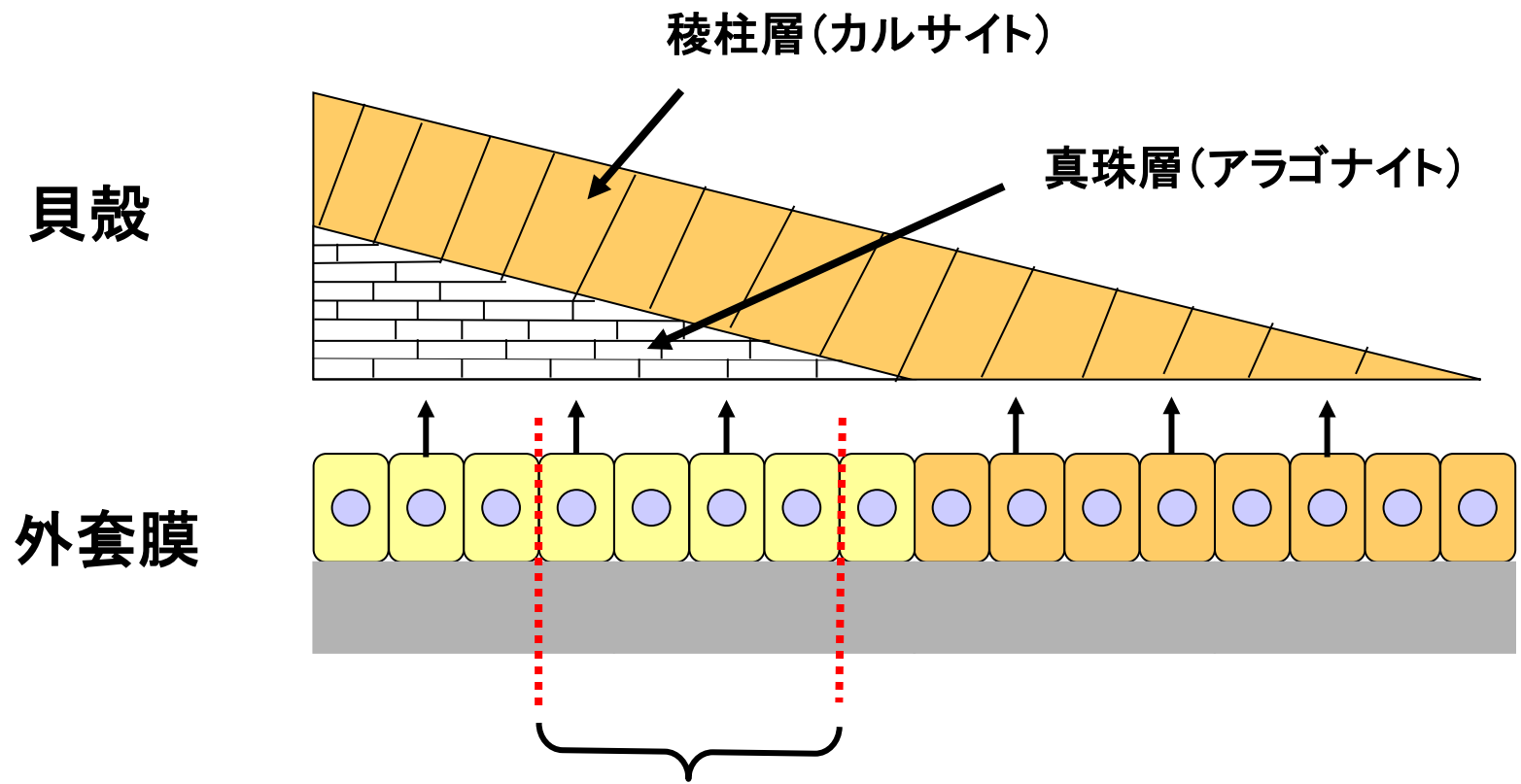
**藤田昌世**: 1915 高知宿毛湾で商業ベースに乗る真円真珠の養殖に成功。

（写真は、「三崎臨海実験所を去来した人たち」、磯野直秀著、学会出版センター（1988）口絵より）

# アコヤガイの軟体部



# 外套膜中央部上皮細胞をピースとして移植

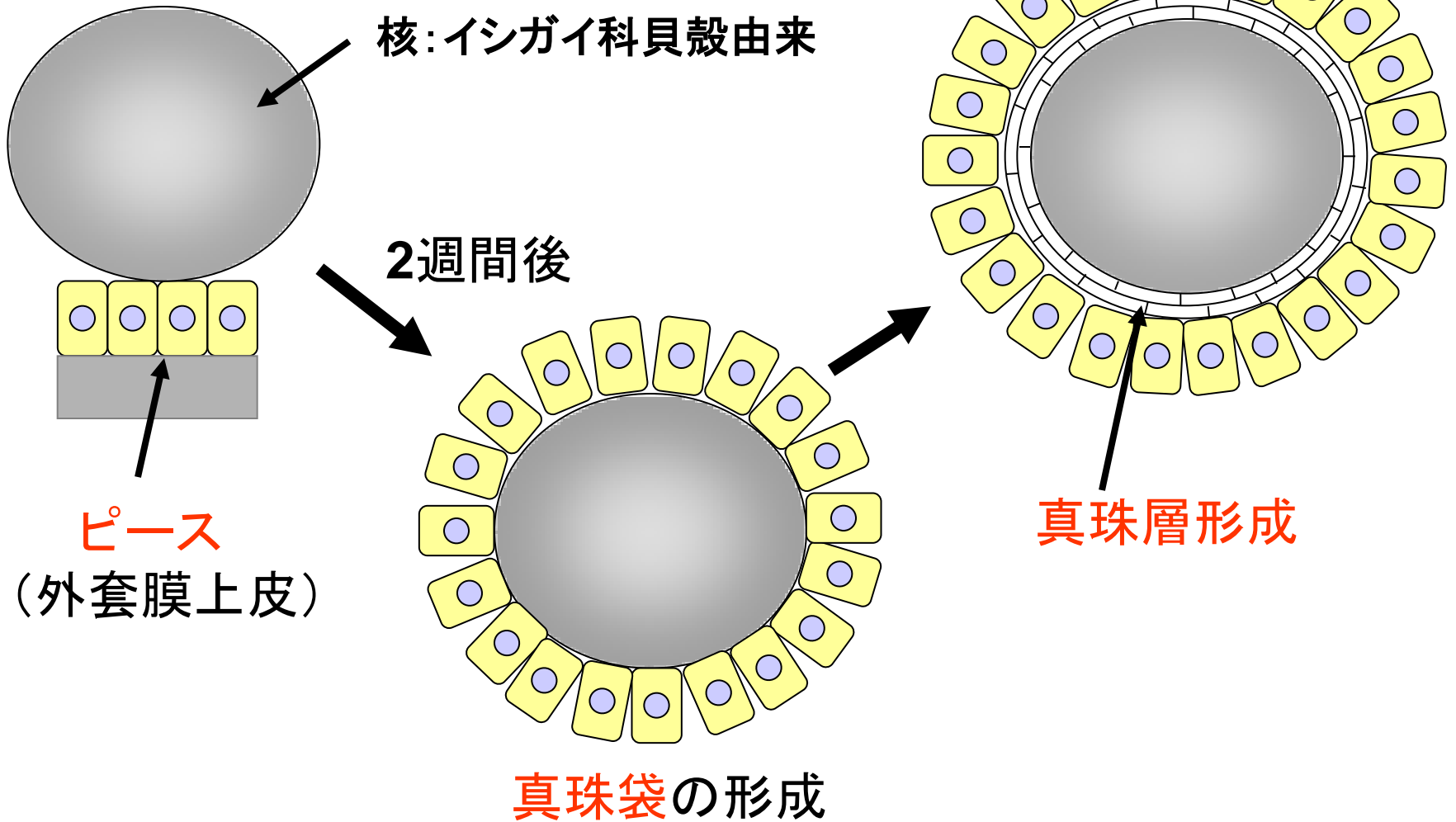


ピース(組織片)として  
核とともに生殖巣に移植



# 真珠の形成機構

生殖巣に移植(核入れ、挿核)



# 真珠の養殖

5~8月

12, 1月

12, 1月

核  
入  
れ

海水中(約半年)

浜  
揚  
げ

浜  
揚  
げ

約1年半



ピースの調製



核入れ

\* 上2枚は、増田真珠様の作業風景の写真です

# 真珠養殖現場(宇和島湾)



核入れ後、海へ戻す



貝の掃除(付着生物を取り除く)



筏につるす、リアス式海岸(静かな海)



真珠の成長状況を調べる

# 内 容

1. 真珠形成はバイオミネラリゼーションの一つ
2. 真珠と貝殻の真珠層は同じ作られ方で作られる
3. 真珠はどのようにして作られるのか
4. **バイオミネラリゼーションの応用の拡がり**

# 研究・応用の拡がり

他のバイオミネラルの  
形成機構

真珠養殖  
良質の真珠

環境科学  
CO<sub>2</sub>の固定

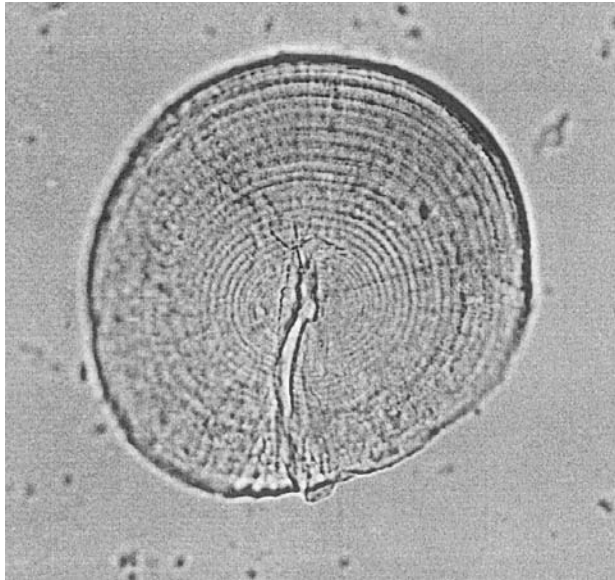
バイオミネラリゼーション

材料科学  
有機・無機複合材料の  
創製

疾病  
骨・歯  
腎臓結石



# 魚類の耳石(扁平石)



†東京大学農学生命科学研究科水圏生物科学専攻  
青木一郎教授よりご提供頂きました

輪が1日に1本形成される。

(日周輪、概日リズム)

日齢と誕生日がわかる。

暗い部分: 有機物が多い。

明るい部分: 無機物が多い。

CaCO<sub>3</sub>: アラゴナイト

微量元素の分布によって生活環境履歴がわかる。

2種類の基質タンパク質を発見

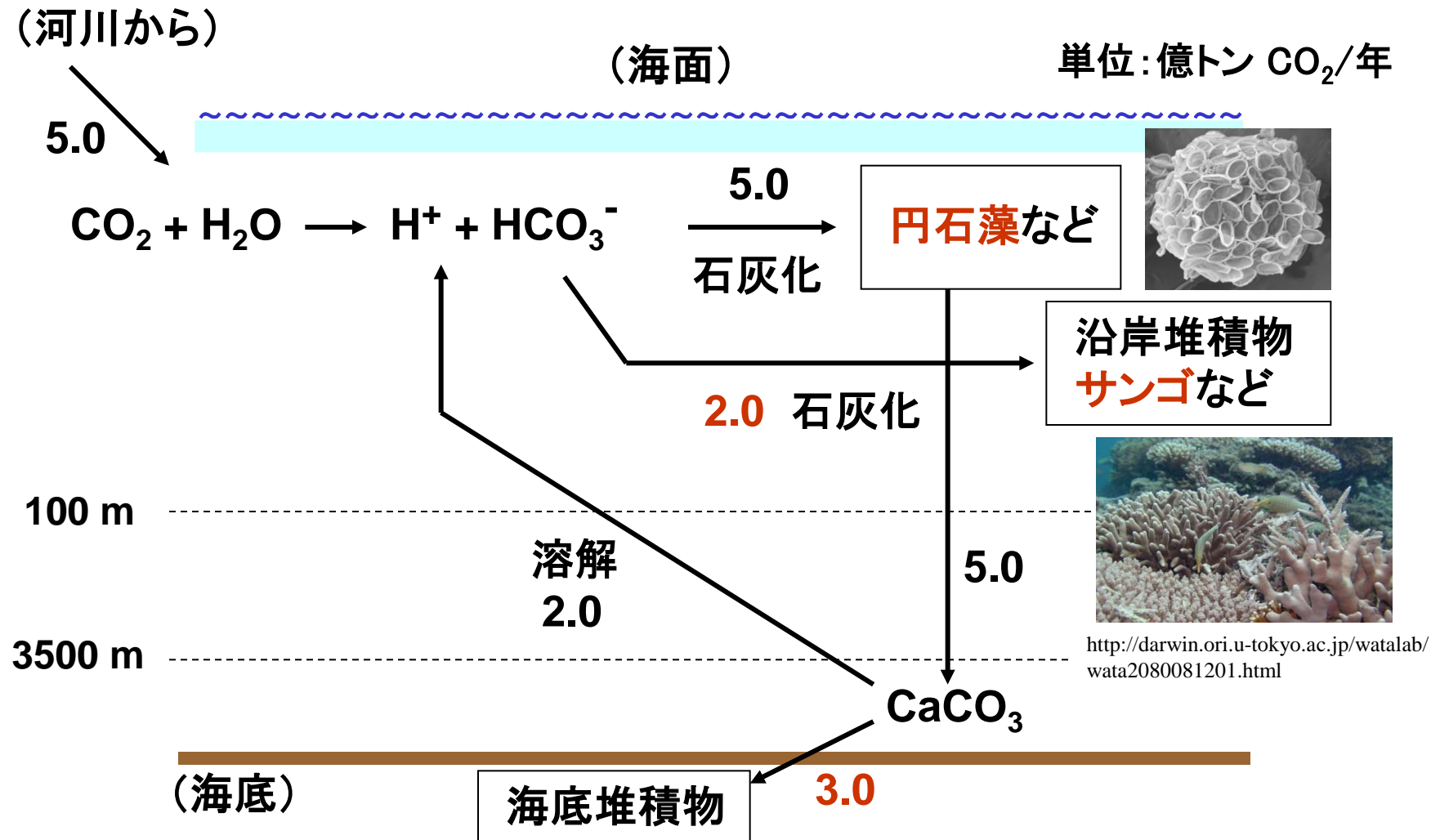
**OMP-1**: 暗い部分と明るい部分に  
存在  
耳石の成長に必須

**Otolin-1**: 暗い部分にのみ存在  
耳石を内耳に固定する  
役割



# 海洋における石灰化に伴う二酸化炭素の収支

(海洋の植物プランクトンの光合成によるCO<sub>2</sub>固定量: 920)



# 材料科学への応用

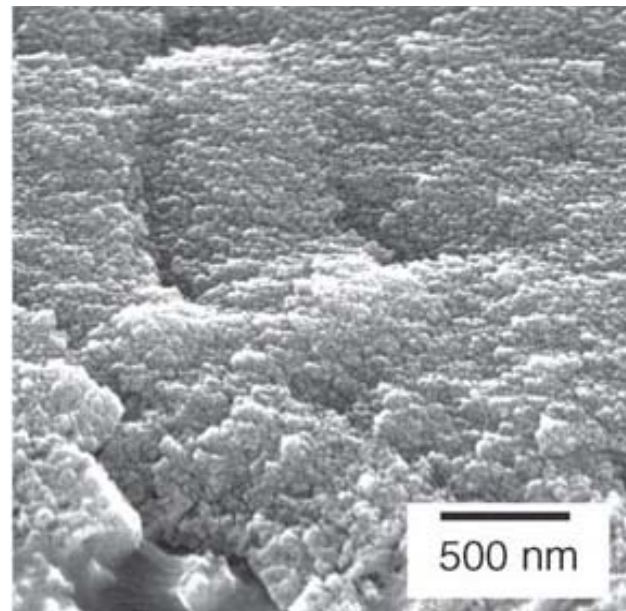
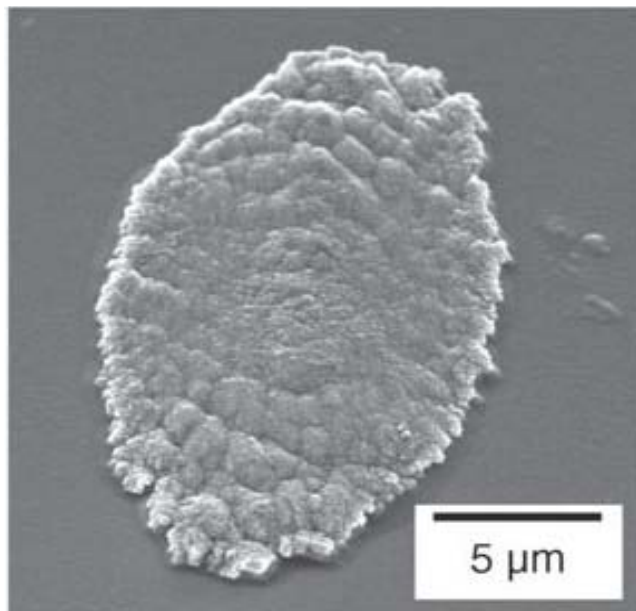


アメリカザリガニ

外骨格に含まれるペプチド(CAP-1)  
(合成高分子化合物)



キチン薄膜上で炭酸カルシウム結晶形成



# 医歯薬学への応用



## ◆骨・歯に関する病気

骨粗しょう症(治療薬の開発)

歯周病

## ◆異所性石灰沈着、代謝異常

腎結石(リン酸カルシウム・蓚酸カルシウム)

血管(動脈硬化)、筋肉

# イルカの肝臓中の水銀



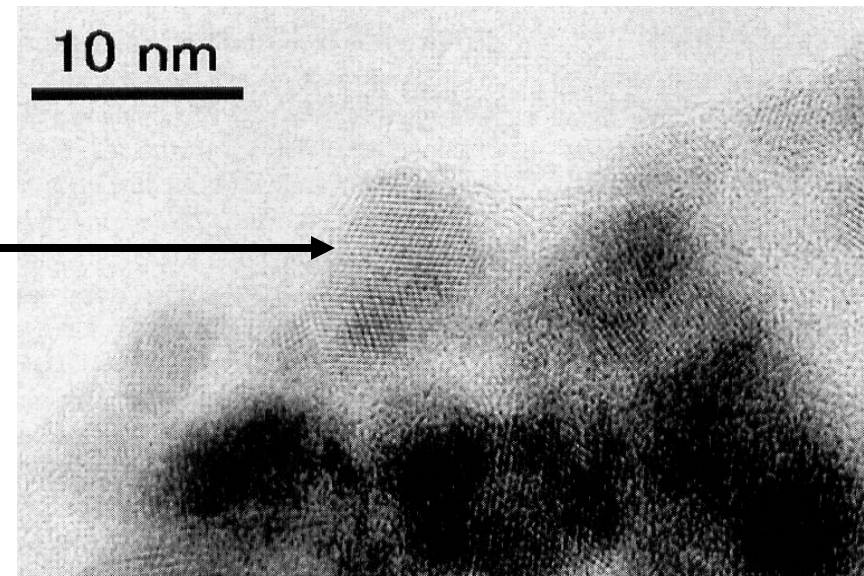
海洋の食物連鎖網の頂点  
肝臓中に高濃度の水銀  
(>100 ppm)

・メチル水銀ではない

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3a/Dolphin%2C2007-4-13.jpg>

$\text{Hg}(\text{S}_{0.34}, \text{Se}_{0.66})$ の結晶  
セレン化(硫化)水銀

解毒作用



†Ng et al., Proc. Jpn. Acad., 77, 178-183 (2001) Fig. 1

# まとめ

1. 真珠の形成はバイオミネラリゼーションの一つ。
2. バイオミネラリゼーションは下等な生物から高等な生物まで普遍的に見られる。
3. バイオミネラルに含まれる有機基質が重要である。
4. 真珠形成(アラゴナイト、層状構造)には、それに含まれている基質タンパク質Pif 80、Pif 97が重要な役割を果している。

## バイオミネラリゼーションの拡がりと応用

- (農水産業) 効率的な真珠生産、丈夫な作物生産、水産資源解析
- (環境科学) 効率的なCO<sub>2</sub>削減(石灰化生物の保護・維持)
- (材料科学) 新規な有機・無機複合材料の創成
- (医歯薬学) 骨歯疾患に対する治療薬の開発

**ご清聴ありがとうございました。**