

「2013 応用理学部会 in 北海道」2013/10/3

# 国際宇宙ステーション「きぼう」 での氷成長実験

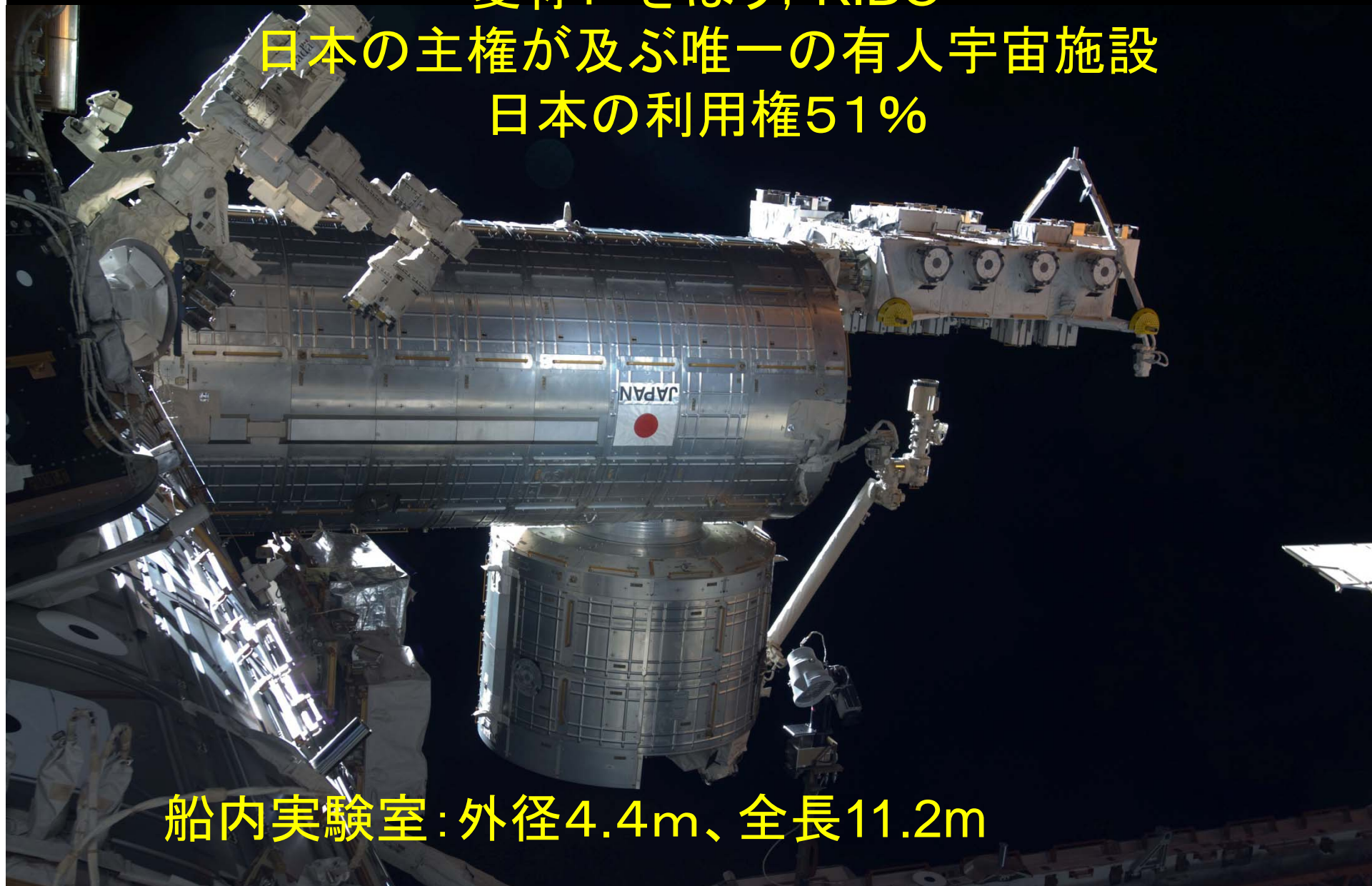
古川 義純  
(北海道大学低温科学研究所)

# 日本実験モジュール (Japan Experiment Module)

愛称: きぼう; KIBO

日本の主権が及ぶ唯一の有人宇宙施設

日本の利用権51%



船内実験室: 外径4.4m、全長11.2m

# 宇宙環境の特徴

微小重力(無重力)

高真空

良好な視界

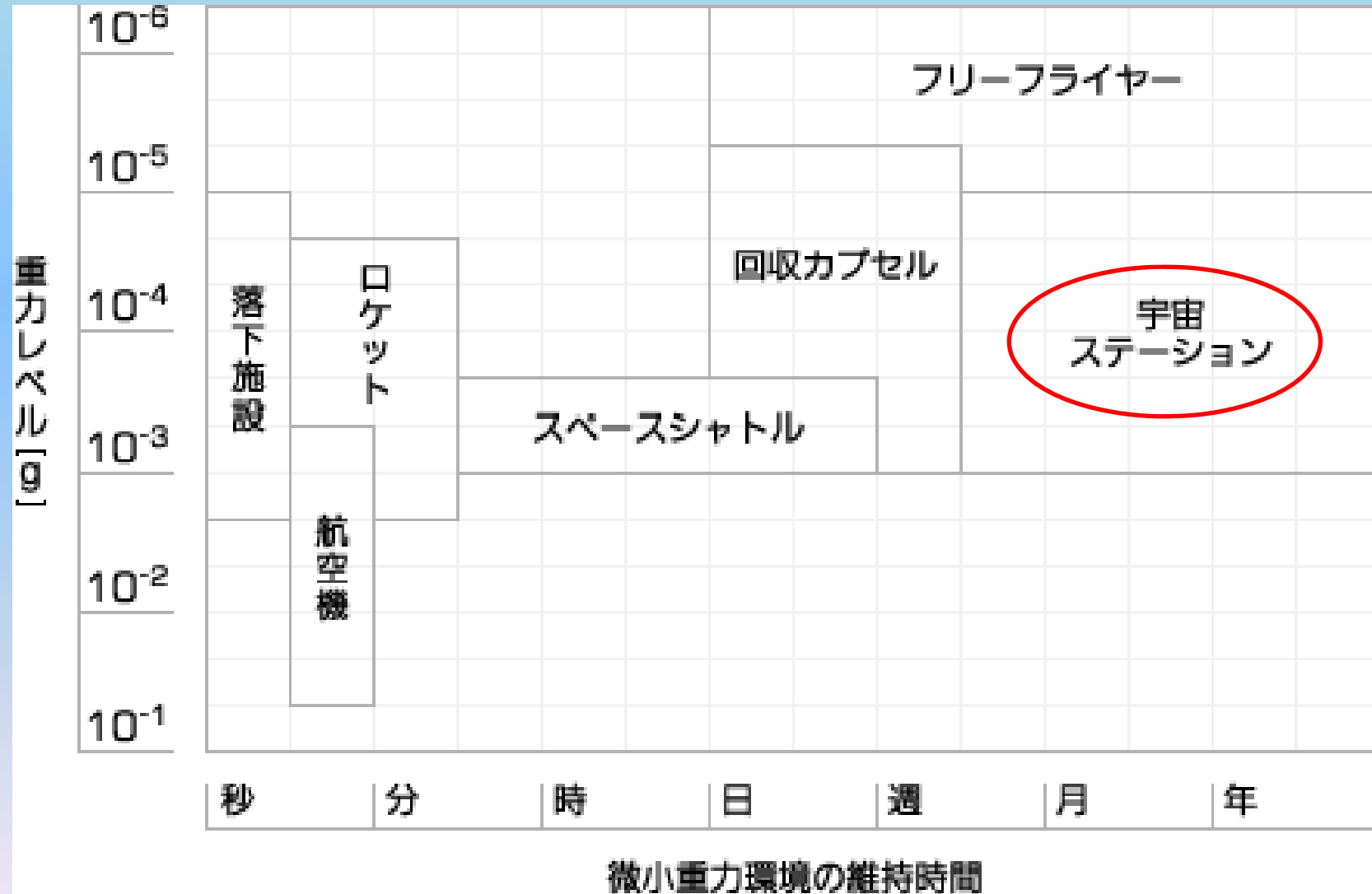
宇宙放射線

豊富な太陽からのエネルギー

軌道上の熱環境

他

# 様々な方法で作られる微小重力環境の重力レベルと持続時間



# 雪と氷の結晶の形の特徴

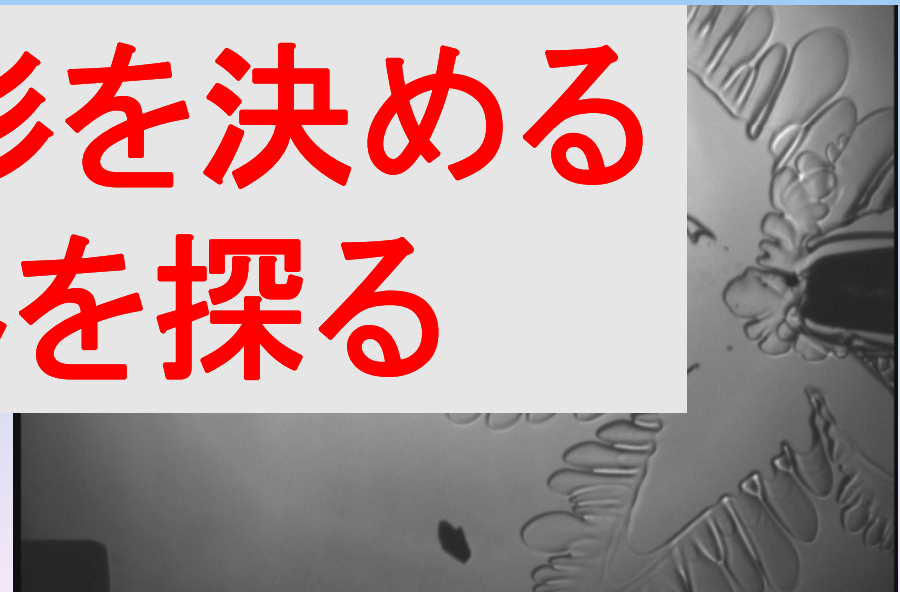
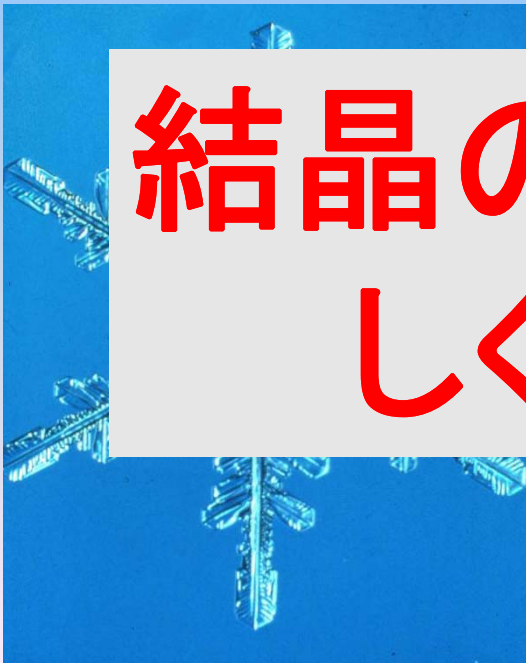
- 雪の結晶

結晶の外形も細部も基本的に六方対称性が保たれている

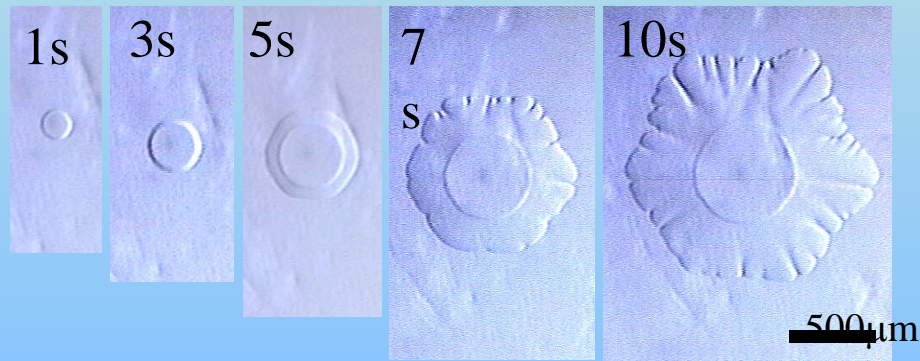
- 氷の結晶

結晶の外形は六方対称だが、細部は必ずしもそうではない。

結晶の形を決める  
しくみを探る



# 氷結晶の立体構造

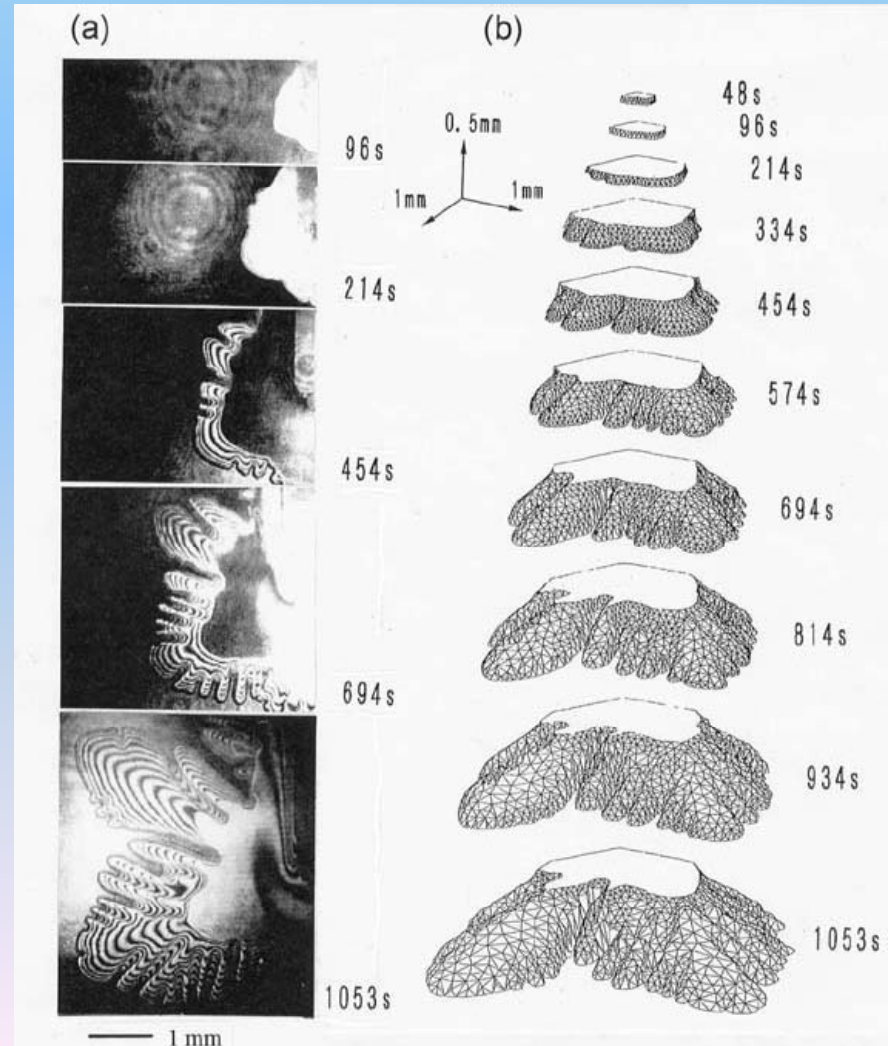


円盤状結晶から樹枝状結晶へ発展



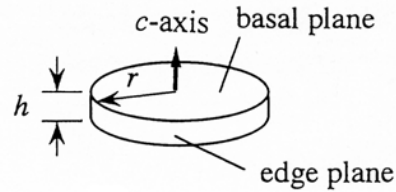
マッツエンダー干涉計

## 3次元構造パターン発展 (Shimada Furukawa)

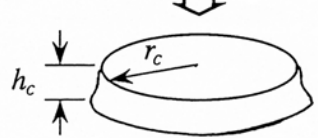


# 氷結晶の立体パターンの時間発展

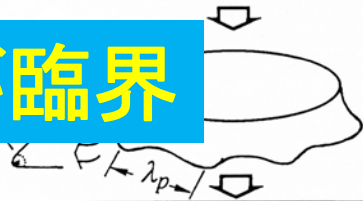
ステージ 1  
円盤成長



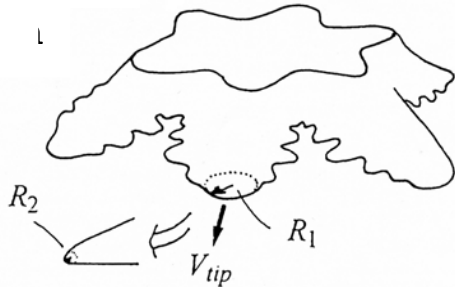
形態不安定化



厚みが臨界



ステージ 2  
樹枝状成長



円盤成長

安定成長

円盤の縁における形態不安定化

不安定成長

六方対称の発達した樹枝状成長

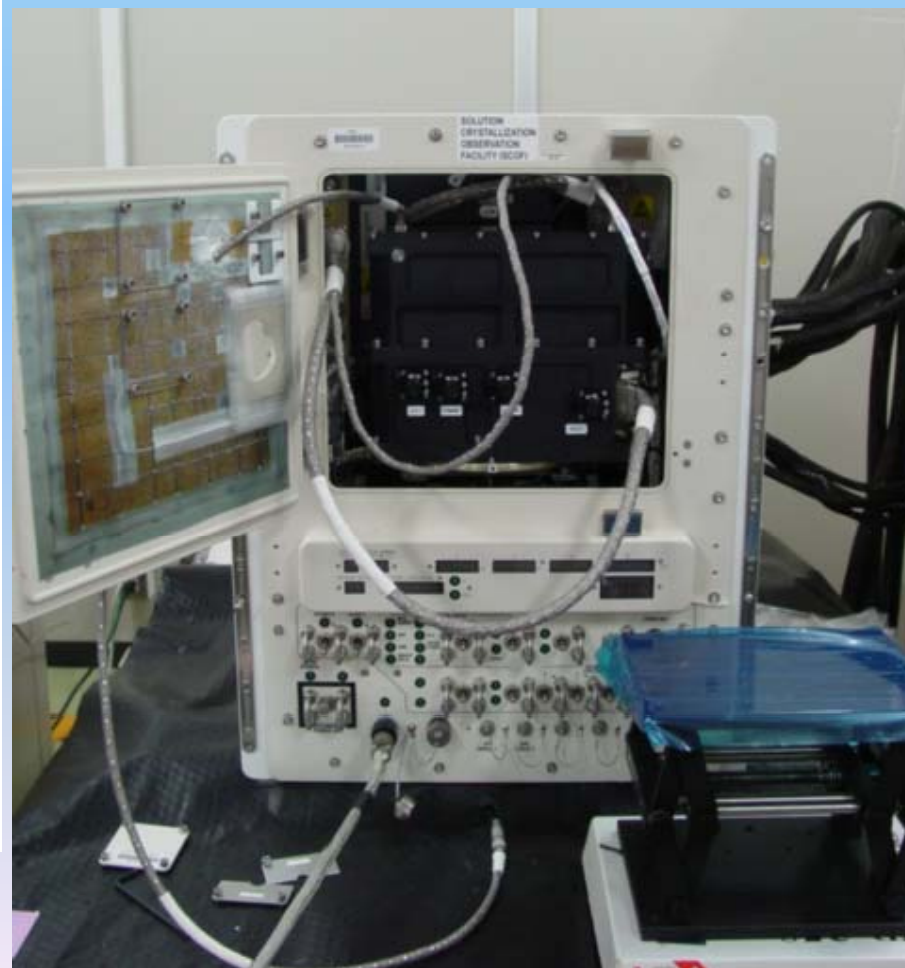
本研究の最終目標

- 円盤成長機構の解明
- 形態不安定化機構の解明
- 樹枝状成長機構の解明

# 実験装置／供試体



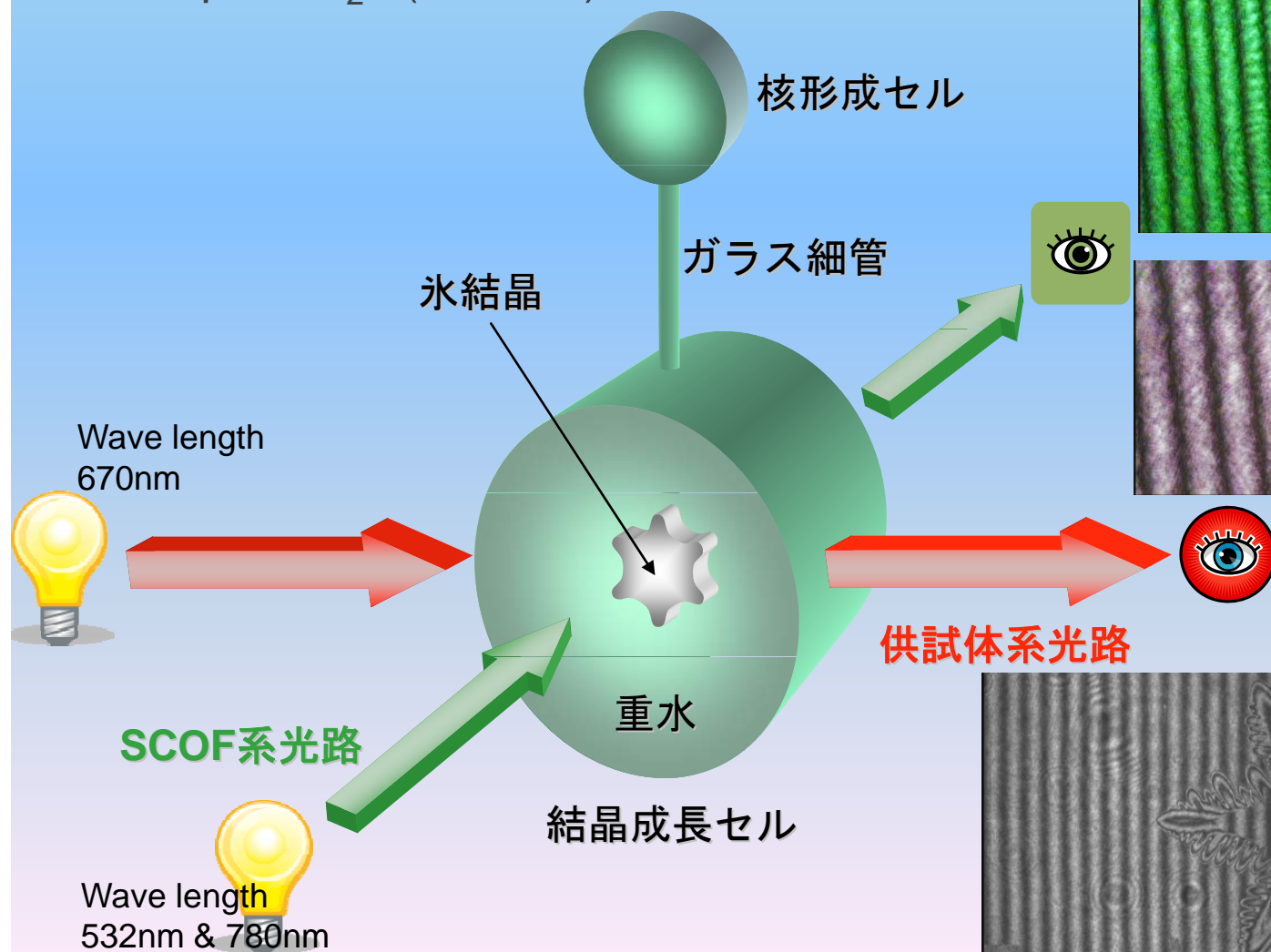
Ice Crystal Cell  
(25cm × 30cm × 21cm)



溶液結晶化観察装置 (SCOF)

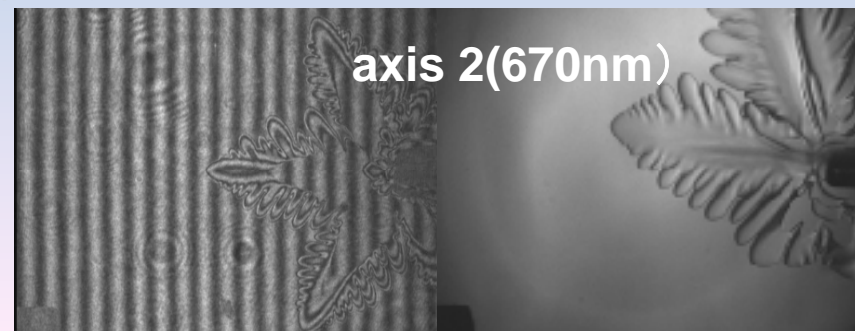
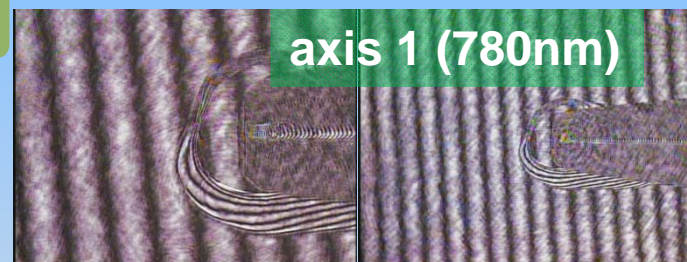
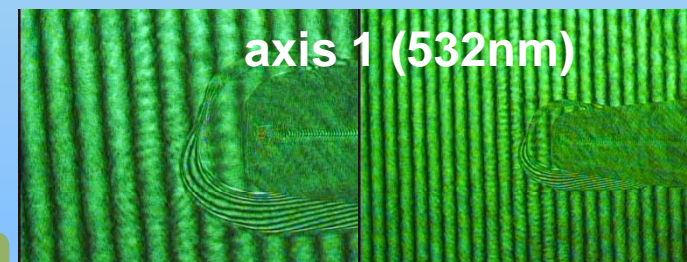
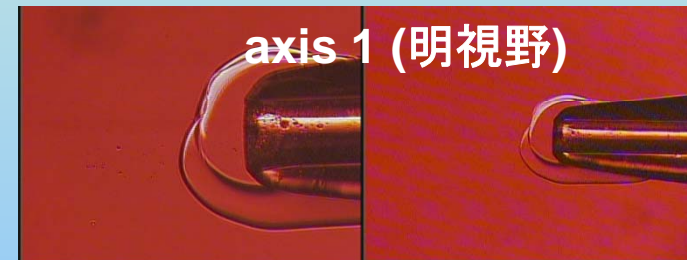
# 氷結晶成長システムの概念図

成長セル: 26mm in diameter, 24mm long  
核形成セル: 6mm in diameter, 1.2 mm thick  
試料: pure D<sub>2</sub>O (>99.9%)



4X

2X



# Ice Crystal Cellの特徴

- 可動部分がなく、温度の変化のみで結晶成長実験が可能。
- 結晶成長の核となる種結晶を保持する必要がない。
- 温度（過冷却度）のみを実験パラメータとして変化させることで、さまざまなパターン変化を観察できる。
- Cell内に干渉光学系を内蔵しているため、SCOFと合わせて2軸での観察が可能。

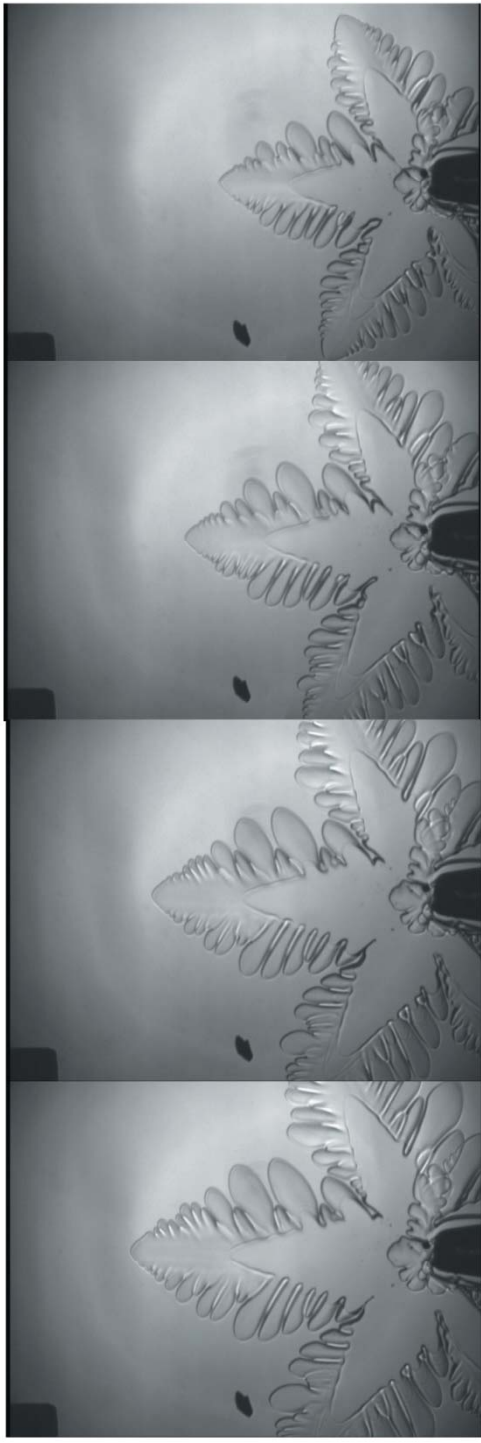
# 実験の経過

- 2008年10月20-31日 KSCにて、射場最終作業。
- 2008年11月14日 エンデバーにて打ち上げ
- 11月28日 (GMT333) 供試体取り付け
- 11月29日 (GMT334) 地上から光学調整テスト
- 12月2日 (GMT337) 実験開始
- 2009年1月31日 ライフ系実験のためいったん休止
- 2009年2月3日 ディスカバリー打上延期により実験再開  
2月18日までに、134回の実験を終了
- 2月19日 実験装置の不具合発生。実験中止。
- 3月5日 実験装置不具合再確認。実験終了。
- 7月末 若田飛行士とともに装置が地上に帰還

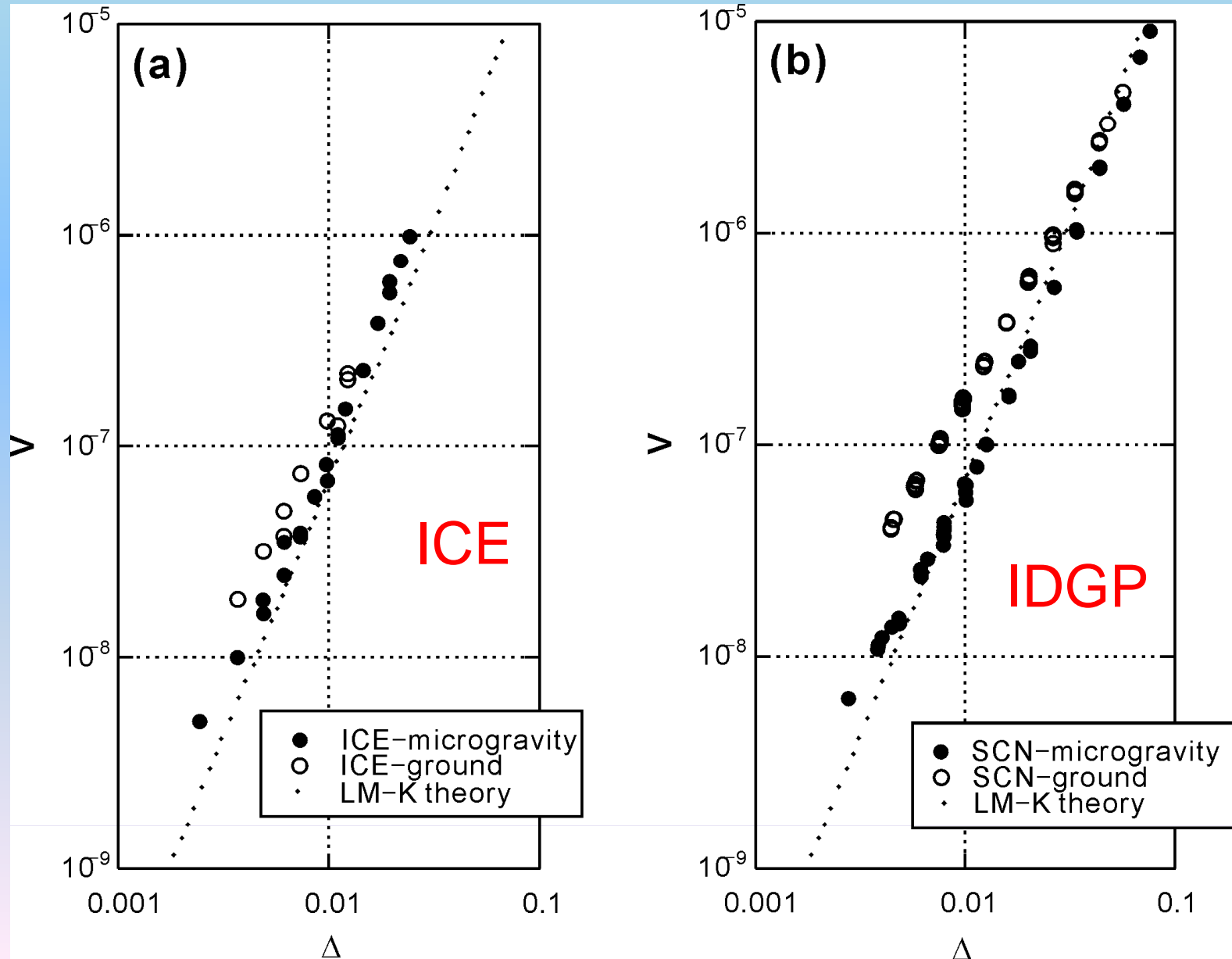
# 氷結晶成長その場観察条件

宇宙実験で使用した試料: Pure D<sub>2</sub>O (重水)  
(99.9%)

- ◆H<sub>2</sub>O結晶と、形態形成に大きな違いはない。
- ◆D<sub>2</sub>Oの融点 (+3.8°C) は、H<sub>2</sub>Oの融点 (0°C) より高い。限られたresource (最大120W) による冷却能力に有利。
- ◆融点近傍における密度と屈折率の温度に対する勾配がD<sub>2</sub>Oのほうが大きい。対流効果、温度分布の可視化に有利。



# 樹枝状結晶の先端での成長速度（地上と宇宙）



# 宇宙実験実施の成果

- 実験システムは、すべて正常に稼動し、**134回の実験**回数をこなした。(予定は、110回。)
- 135回目の実験で装置に不具合が発生し、2009年3月5日実験終了。原因究明のため、7月に**地球に帰還**。結果的に問題なし。
- 氷の結晶成長が、**確率100%**で観察された。
- 完全に**対流が抑制**された状態が実現。
- 実験装置の**完成度は、極めて高い**。
- 実験画像の地上への転送に問題がある。

## Ice Crystal 2

### 生体高分子が氷結晶成長にどのように作用するか？

結晶外形が大きく変化

氷界面での成長ダイナミクスが変化



六角板状結晶から、  
平らな面で囲まれた樹枝



成長ステップのダイナミックな運動  
自励的な振動を伴う成長

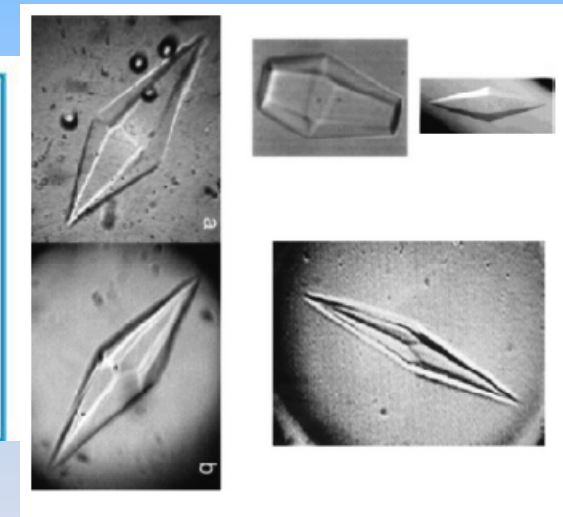
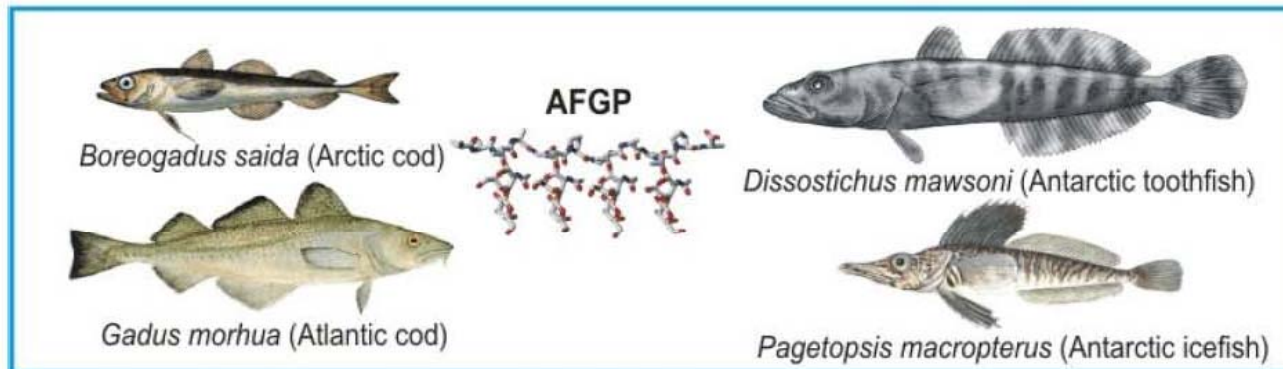


雪の結晶(水蒸気から成長)

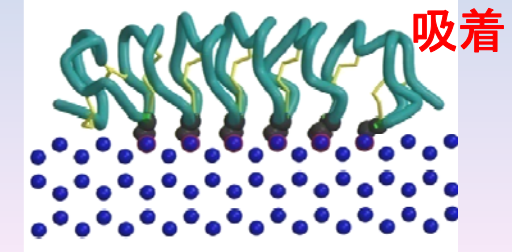
# 生体高分子: 不凍糖タンパク質 (antifreeze glycoprotein:AFGP)

## 特徴

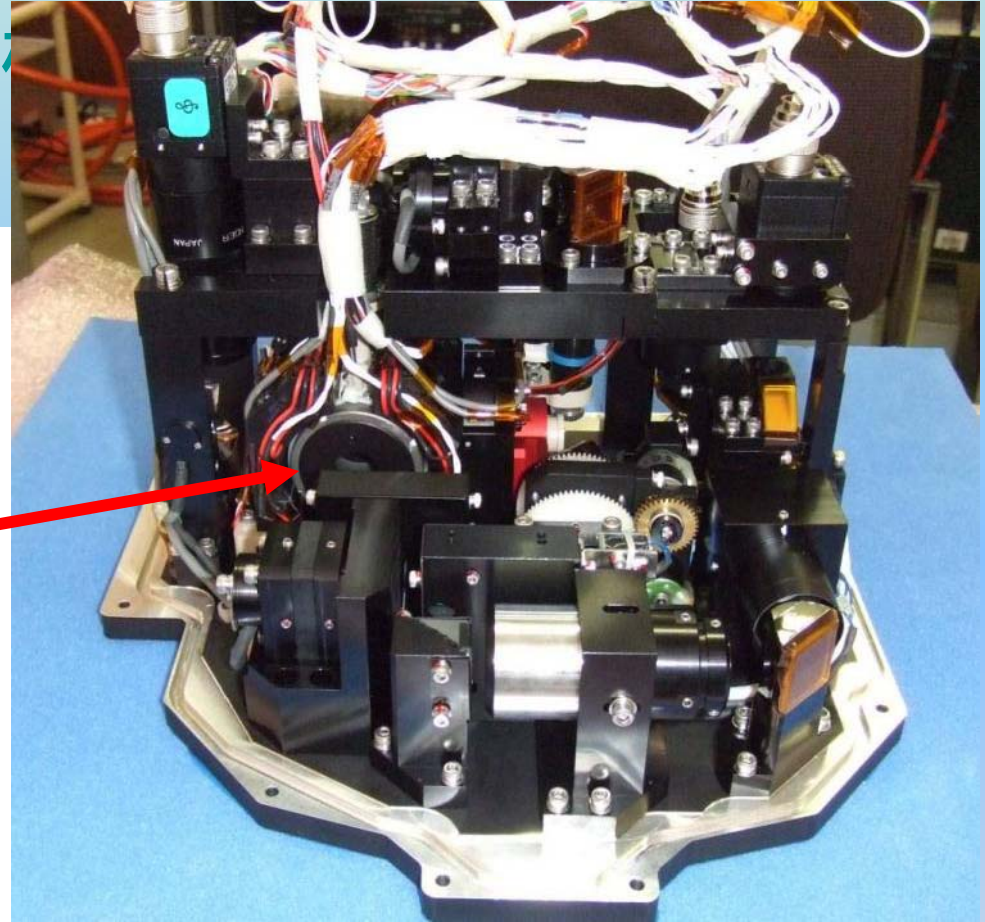
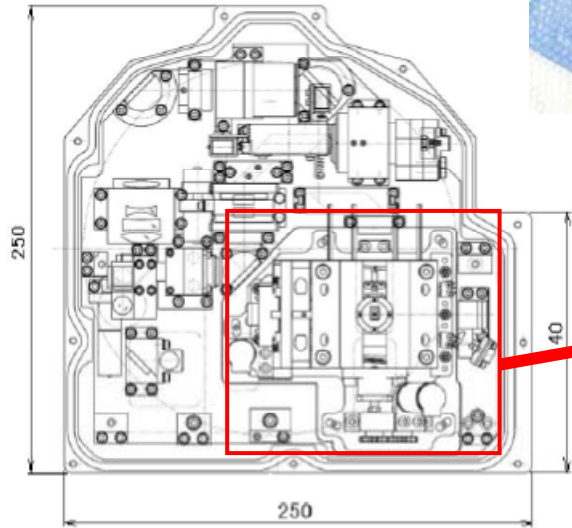
- 氷の結晶成長を制御する機能性タンパク質
- 極地の海に住む魚や寒冷圏に住む昆虫等の血液に含まれる
- 変温生物が氷点下でも凍結することなく生き残るための戦略を担う物質



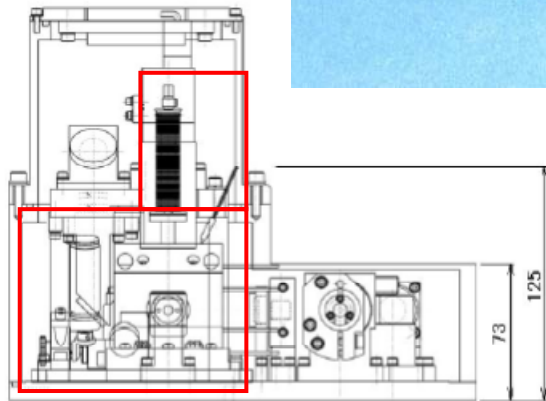
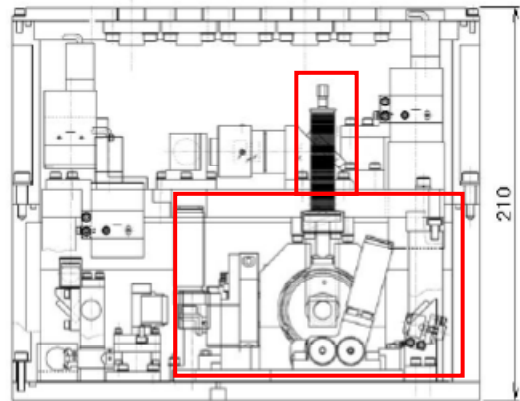
不純物による凝固点降下ではなく、結晶の界面に吸着して機械的に界面の移動を制御する



本体の外観



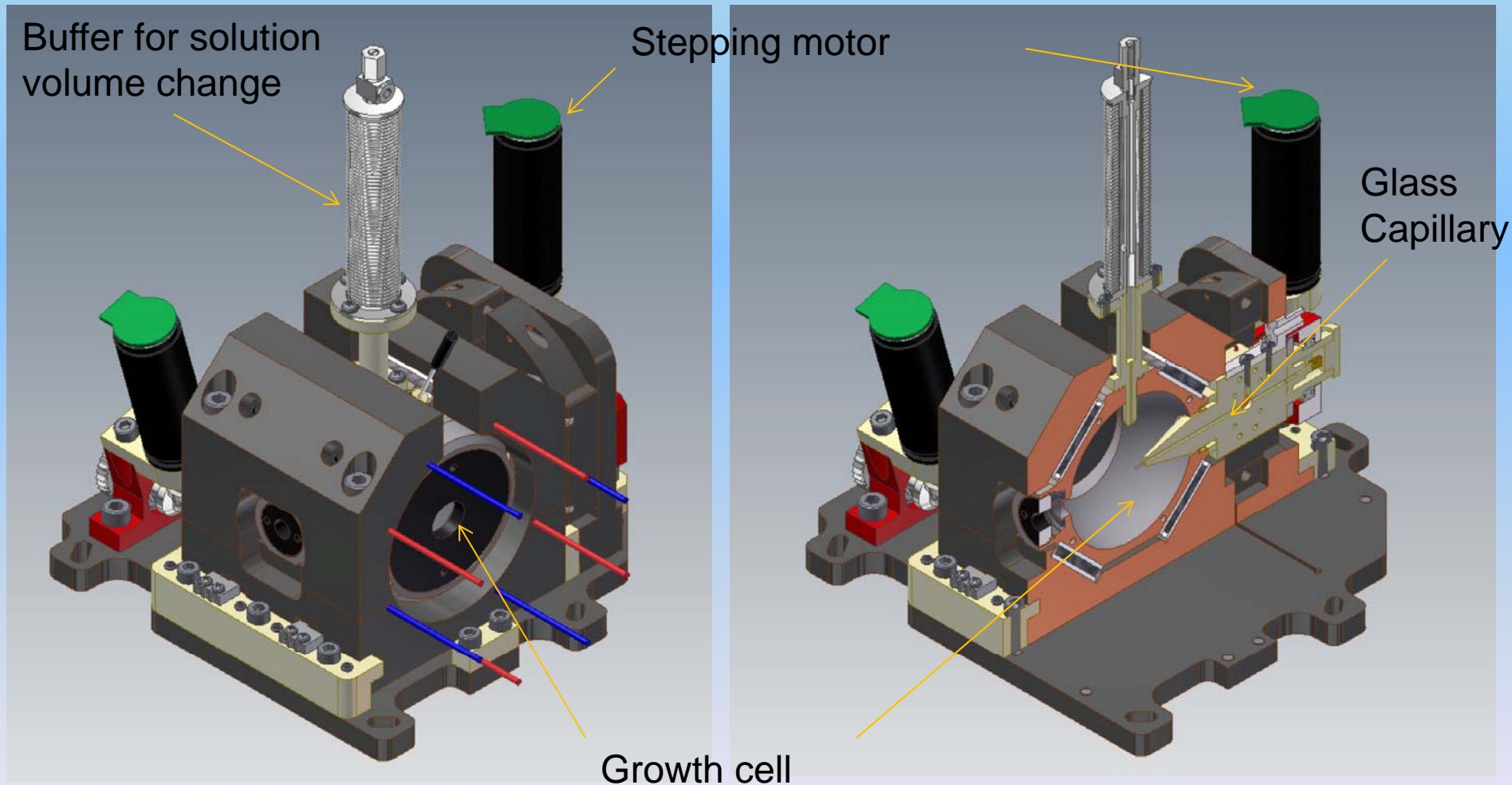
本体の内部



赤で囲った部分が試料セル

試料セル部の担当は北大

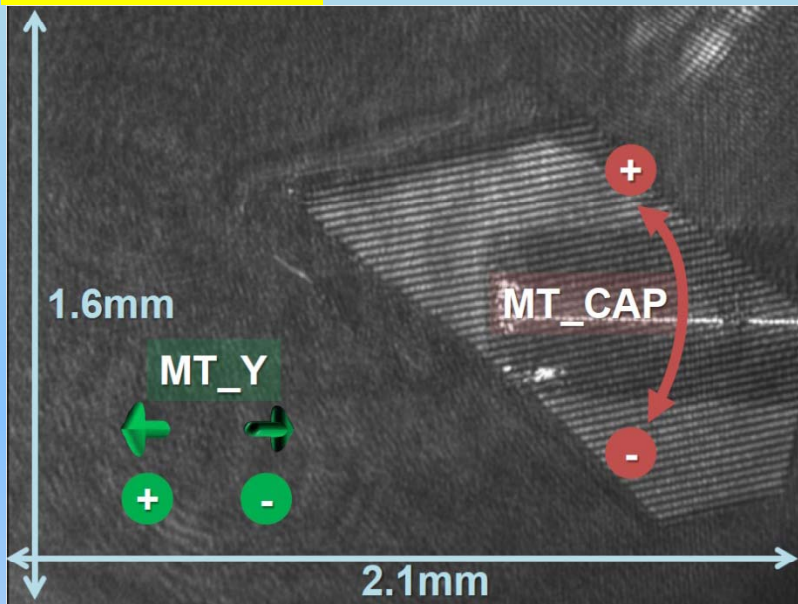
# Ice 2用の結晶成長装置 (北大低温研で設計・製作)



ステッピングモータにより、毛細管の回転、焦点の合致が可能

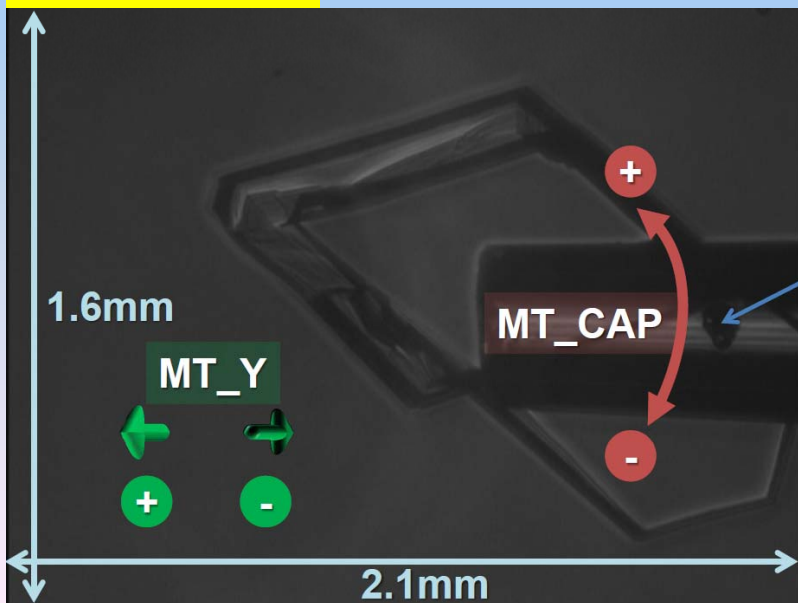
# キャピラリ回転・焦点移動

Ch1(干渉計)

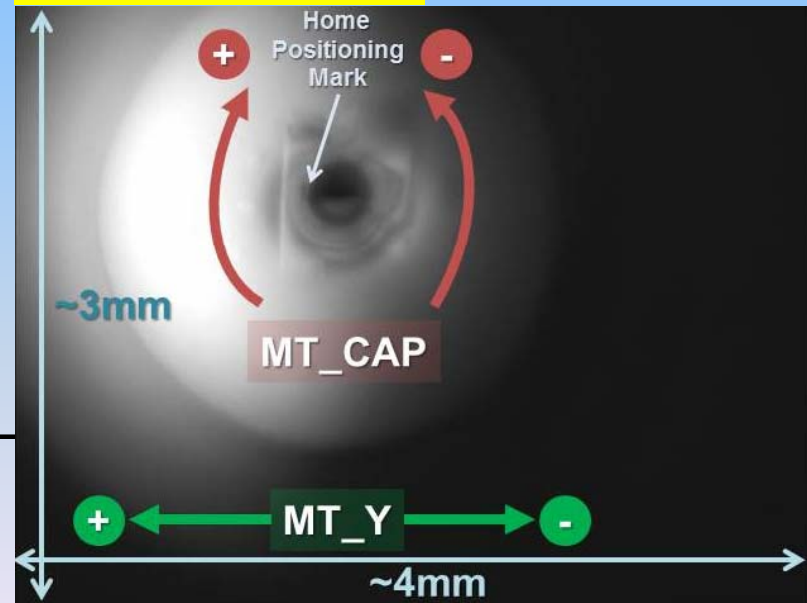


MT-CAPでキャピラリを回転させることができる。  
MT-Yで焦点を動かすことができる。

Ch2(位相差)



Ch3(方位確認用)



マーカー

鏡像になっているので、移動の向きが本来と逆です

第1回目実験開始 2013年8月26日 午前8時  
正常動作し、結晶成長を確認

第2回目実験開始 2013年8月26日 午前10時  
核形成セルの急冷コマンドで動作停止

現状： 原因究明と対策を検討中。  
現在までに、Ice2(我々の装置)は健全で、問題は「きぼう」設置のSCOFにあるらしいことが判明。

対策： 2013年11月初めに、新しいケーブル打ち上げ。  
同11月末から、実験が再開できる。

# 謝 辞

研究者	CI	横山悦郎(学習院大学)
	CI	佐崎 元(北大低温研)
	CI	長嶋 剣(北大低温研)
	CI	麻川明俊(北大低温研)
	CI	灘 浩樹(AIST)
装置開発		中坪俊一(北大低温研)
		真木孝雄(オリンパス)
		山本明日佳(オリンパス)
		友部俊之(IHIエアロスペース)
実験運用		吉崎 泉(JAXA)
		田丸晴香(JAXA)
		島岡太郎(JSF)
		曾根武彦(JAMSS)