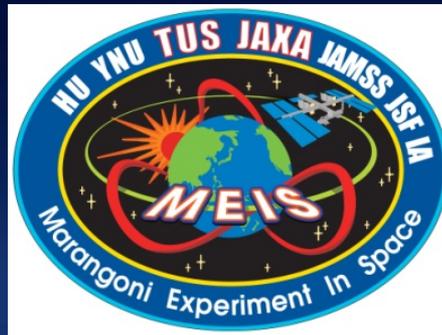




「きぼう」船内実験

「マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程」



MEIS : *Marangoni Experiment In Space*

代表研究者 河村 洋（諏訪東京理科大学）



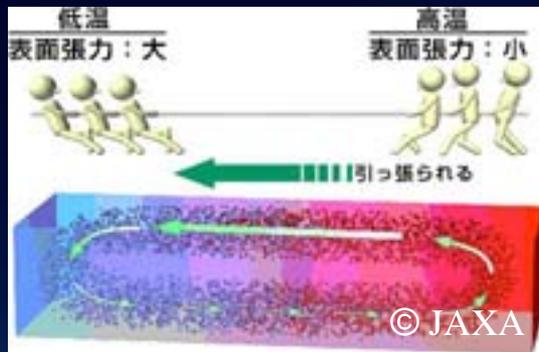
マランゴニ効果

マランゴニ対流

自由表面における表面張力の大きさは、
表面上の濃度および温度によって変化する。

濃度 C , 温度 T
低

表面張力 σ
高



濃度 C , 温度 T
高

表面張力 σ
低



Carlo Marangoni

(イタリア物理学者, 1840-1925)

ワインの涙



背景

新材料開発

メモリーデバイス用基板

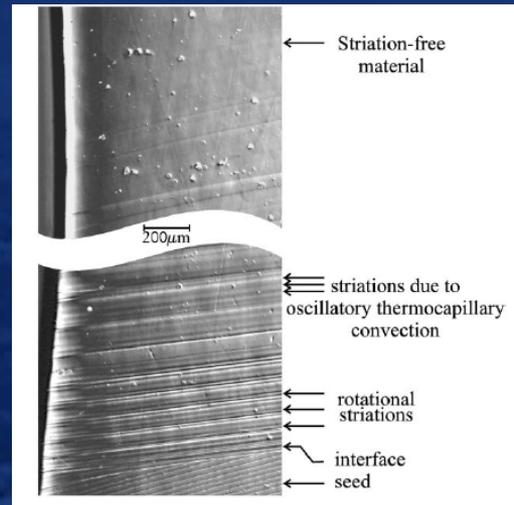
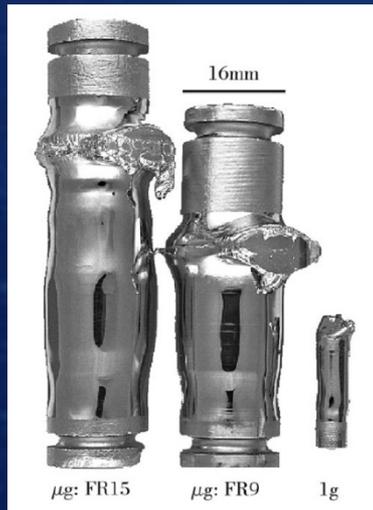
マイクロプロセッサデバイス用基板

YAGレーザー発振素子など

融液の流れの影響大 → 微小重力による浮力対流抑制

実験結果：製品中にマランゴニ対流が生起し、欠陥縞が発生

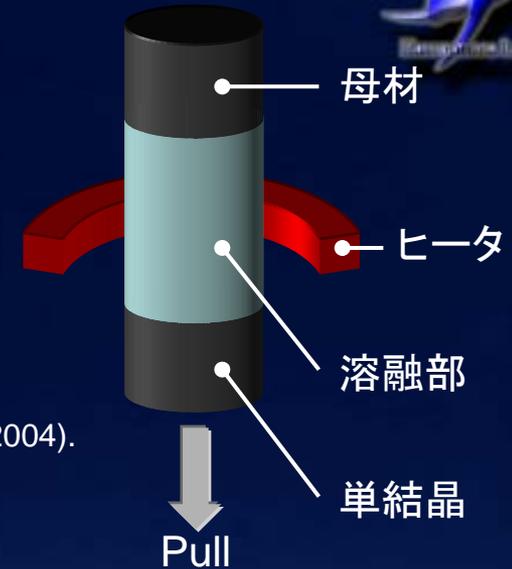
宇宙実験 マランゴニ対流の効果を顕在化



◇ フローティングゾーン (FZ) 法

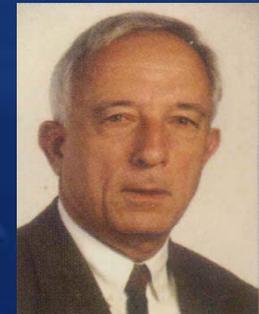


P. Dold, *J. Crystal Growth* (2004).



◇ 微小重力環境および地上環境で生成したGaSb(アンチモン化ガリウム)結晶.

Prof. K. W. Benz
Freiburg, Germany





研究の目的

液柱マランゴニ対流において流体力学的不安定性により
発現するダイナミック構造を解き明かす

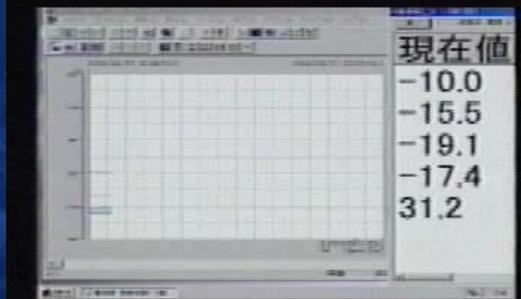
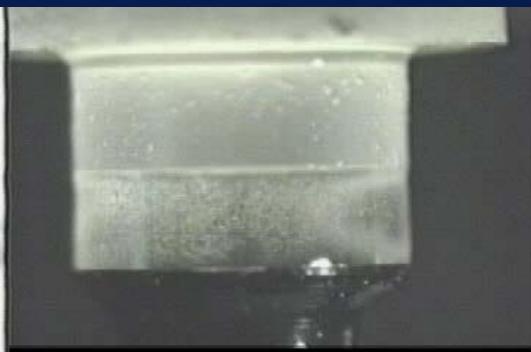
地上では実現できない大型液柱における実験データを取得し、
地上研究の結果と合わせ以下を明らかにする

ハーフゾーン液柱内マランゴニ対流場の様子
(地上実験, 2cStシリコンオイル, 5mm径, 実時間.)

1. 振動流開始条件の決定
2. カオス化過程のシナリオ

↓ 寄与する分野

- A. 界面熱流体力学の進展
- B. 自由界面を有する結晶成長過程
- C. 表面張力支配のマイクロ流体技術



Rg1
Aspect ratio : 0.33
 ΔT : 5.5 - 6.0
Ma : 0.2 - 0.4 [$\times 10^4$]
 ε : 0.2 - 0.3

微小重力実験の波及効果



マイクロ流体技術への応用

- マイクロ流体力学への波及効果
(微量分析化学, 創薬, 生命科学, マイクロベアリングなど)

表面張力の影響に関する認識

⇒ 微小重力環境の有効活用



液滴マイクロベアリング

高効率熱輸送(地上, 宇宙)

- 高熱負荷ヒートパイプ

マランゴニ対流による自己浸潤(Self-Rewetting)作用の活用

⇒ 地上 (次世代高性能パソコン等)

宇宙 (有人活動における大量熱利用時の高効率熱輸送)



マランゴニ対流実験概要

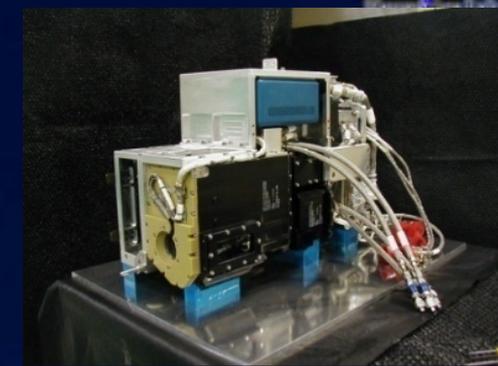


「きぼう」流体物理実験装置に実験用供試体を組み込み実験を実施

液柱を形成し、両端に温度差をつけることで対流を発生させ、流れと温度を観測



流体力学実験装置



実験供試体

シリコンオイル液柱

	地上実験	宇宙実験
直径	< 5 mm	30 mm
高さ	< 3 mm	0~60 mm

温度

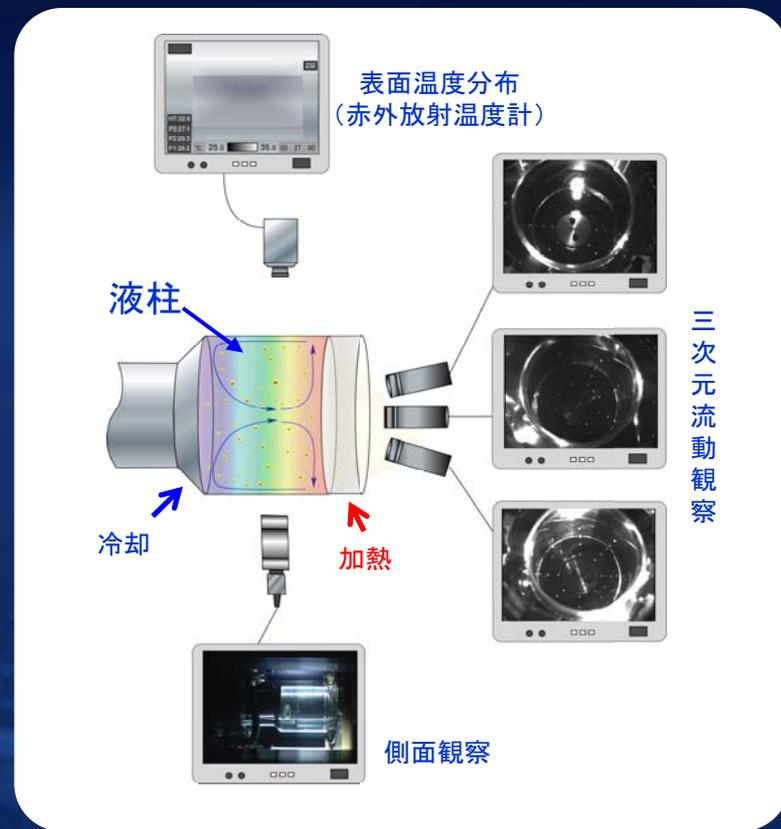
加熱 T_H : 90°C (最高)

冷却 T_C : 5°C (最低)

観察・計測

画像: 5チャンネル

温度データ: 6チャンネル



マランゴニ対流実験の運用体制



ISS宇宙飛行士



国際宇宙ステーション



NASAデータ追跡衛星



ケネディー宇宙センター
(フロリダ州)



ホワイトサンズ地上局
(ニューメキシコ州)

筑波宇宙センター

システム運用

JEMOCS
HTVOCS Front Room

SSIP

実験運用管制

運用ネットワーク

コマンド ⇒
← 画像

SEDA-AP Op.

SSCC

ジョンソン宇宙センター
(テキサス州)

POIC

マーシャル宇宙飛行センター
(アラバマ州)

- 研究者チーム
- 代表研究者 河村 洋 (諏訪東京理科大学)
 - 共同研究者
 - 西野耕一 (横浜国立大学)
 - 上野一郎 (東京理科大学)
 - 大西充 (JAXA)
 - 支援学生 (約15名)

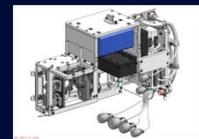


実験準備（実験供試体の組立）

実験供試体の組立 2008年8月13日 (JST)

Gregory Chamitoff 宇宙飛行士

約100ステップにおよぶ組立作業を的確に実施



コンポーネント



組立後

実験装置への組付け 2008年8月19日 (JST)

Gregory Chamitoff 宇宙飛行士

実験装置検証 2008年8月20日 (JST)

地上からのコマンド制御

正常に動作(50のセンサ、カメラ等)

実験初日 2008年8月22日

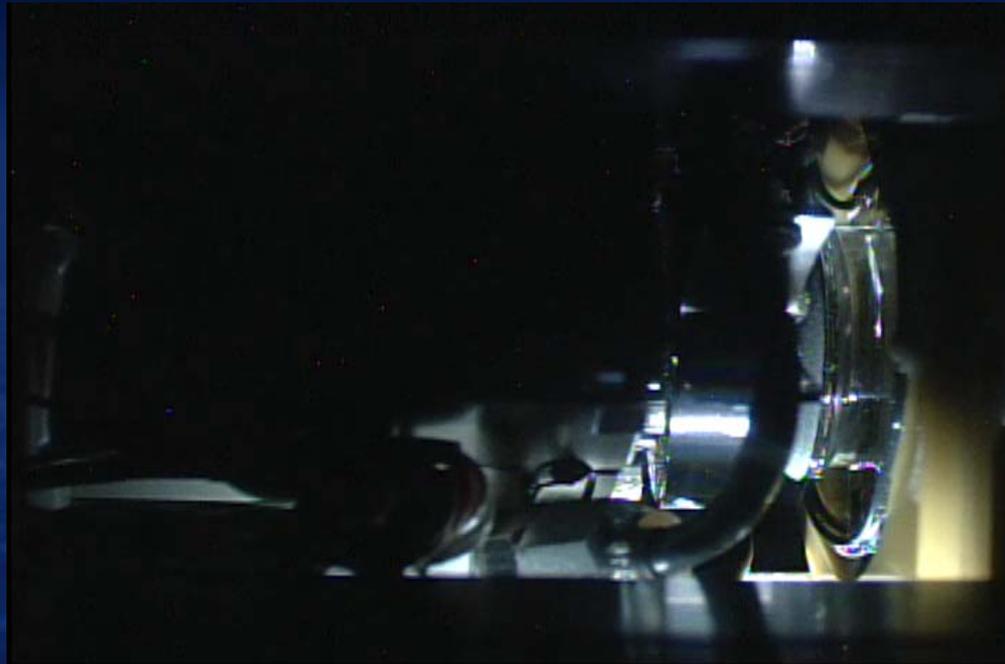


温度液柱長さ: 9.6 mm

温度差: 最大39.4°C



液柱形成後温度差を大きくしたところ、はっきりとした振動流遷移過程を初めて観察



液柱形成、流れの観察(動画)

実験技術上の予想された困難点と解決

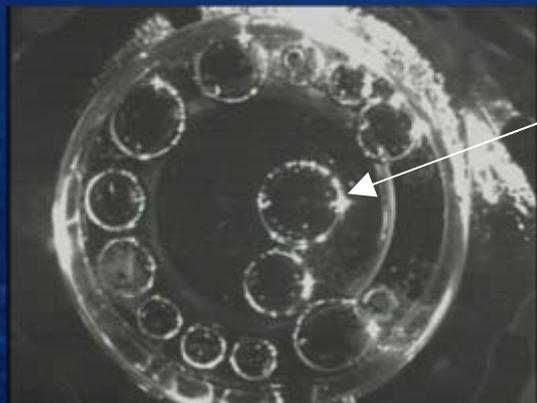


液柱形成

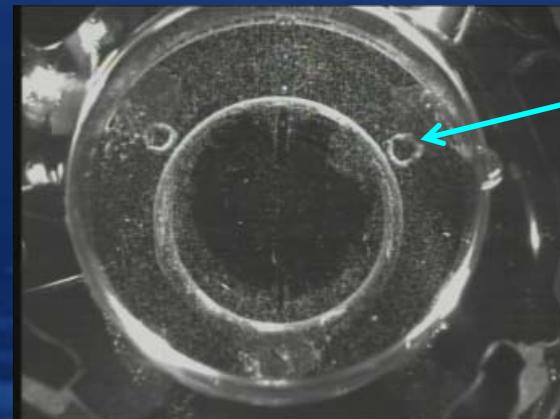
- ◇ オイル漏洩（1年以上前に射場でシリコンオイル充填） ⇒ 問題なし
- ◇ 液柱形成初期のオイル吐出 ⇒ 適切な対処によるリカバリー
- ◇ 液柱保持（撥油コーティング性能、耐振動性） ⇒ 地上より安定な液柱保持
- ◇ 粒子の混合状態、収納 ⇒ 地上より良好

気泡混入・除去

- ◇ 微小な気泡が混入することにより、実験の経過と共に5mm以上まで成長
⇒ 気泡周りのマランゴニ効果を積極的に利用した気泡除去手法の確立



気泡



熱電対

（気泡除去前）

（気泡除去後）

これまでに得られた成果(1)



流れのパターン

動画

定常流から振動流へ

モード数2
(5倍速再生)

動画

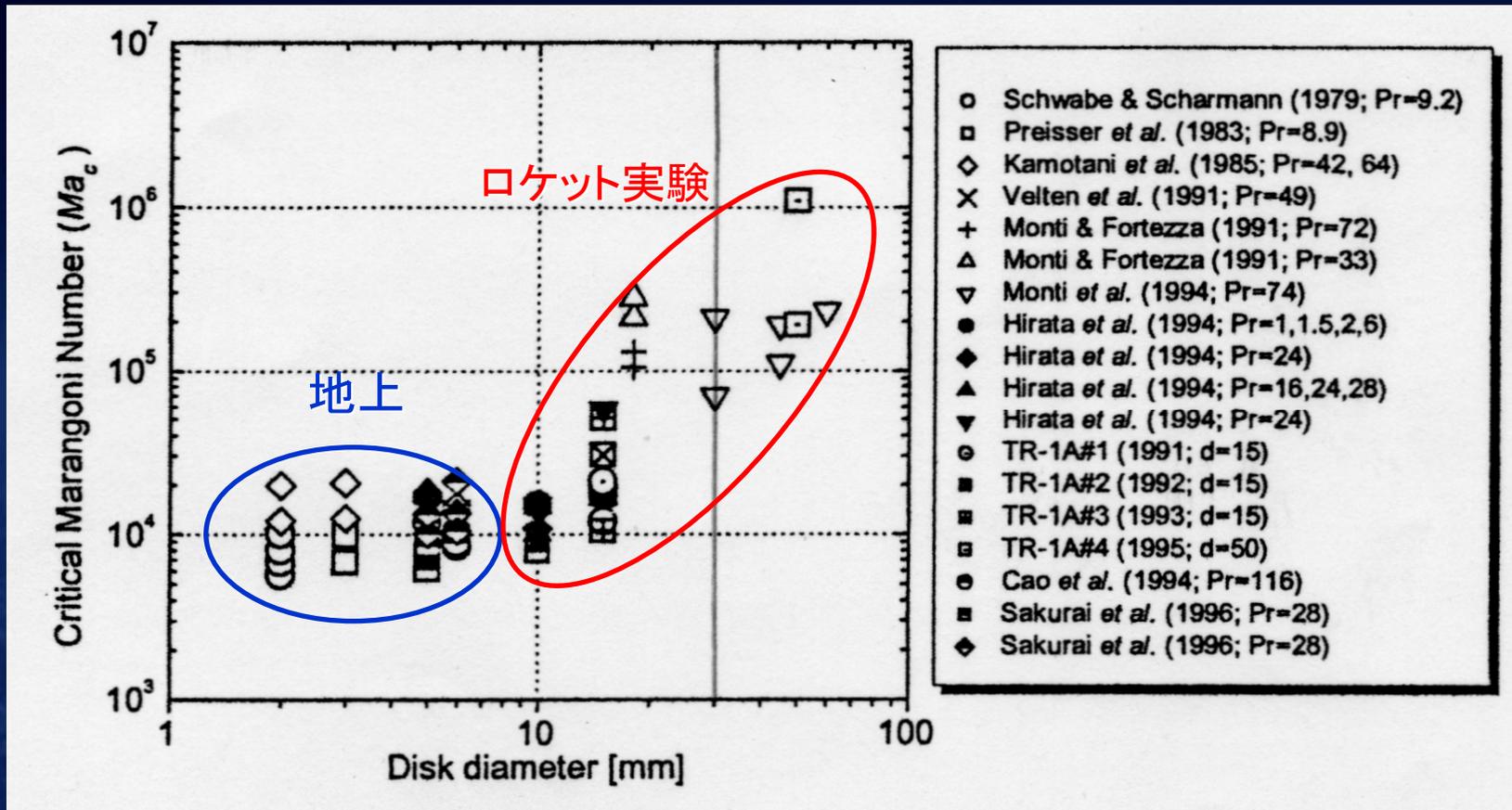
振動流

モード数1
(5倍速再生)

これまでに得られた成果(2)



小型ロケット実験ではパラドックスとされた振動遷移点のサイズ依存性



国際的位置づけ



1. 世界をリードする実験技術の蓄積

透明な加熱板(人工サファイア)を用いた端面観測技術
遠隔操作による液柱形成技術(小型ロケット実験)
流れの3次元観測技術(PTV)

2. 世界をリードする研究の蓄積

界面流体力学(実験及びシミュレーション)

本年10月, 我が国で国際会議を主催

(米, 独, 仏, ベルギー, 露, 東欧, イスラエル, 中国,
日本等約80名参加)

3. 国際チームによる「きぼう」実験の継続

日・欧共同チームによる実験(2011年実施予定)

我が国がリードし, ESA(欧州宇宙開発機構)も支援

今後の予定



第1シリーズでは10月下旬まで実験を行い、液柱の高さを変化させたときの振動流遷移の条件、流れのパターン全体像をつかむ。

第2から第5シリーズでは、表面流速計測、粘性や液柱直径(50mm)の影響に関する実験を予定している。

「きぼう」船内実験室で今後実施予定のマランゴニ実験テーマ

- 「マランゴニ対流における時空間構造」(代表研究者:武田靖(北海道大学))
2009年～2010年に実施予定
- 国際公募「高プラントル数流体のマランゴニ振動流遷移における液柱界面の動的変形効果の実験的評価」
(チームコーディネータ:松本聡(JAXA)、代表研究者:鴨谷康弘(CWRU))
2010年～2011年に実施予定



まとめ

1. 実験装置の軌道上での宇宙飛行士による組み立て

- つくばにおける事前訓練→マニュアルの整備
- 100ステップ以上の複雑な作業を完全に遂行

2. 軌道上での実験運用

- サイエンスチームとJAXA運用チームとの順調な連携
- 非常に精密な操作 (0.01mm, 0.01cc) と計測 (0.01K) 実現
- 初期の試料吐出、気泡混入等のリカバリー
(宇宙ステーションの利点を最大限に活用)

3. これまでの実験の成果

- 地上よりも格段に安定な液柱の保持
- 振動流の開始条件について、従来からの地上実験と宇宙実験の乖離に関するパラドックスを解決する結果を得た
- 回転振動流のモード数等に関する実験データを蓄積中

当該実験のみならず、我が国の宇宙ステーション利用体制・技術のトータルとして、良好なスタートを切ることが出来た。