



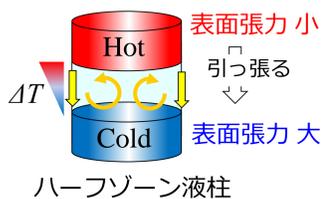
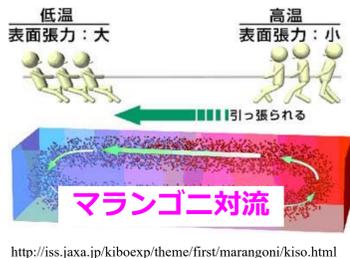
Chaotic Flow Transition of Surface Temperature of Marangoni Convection in Liquid Bridge

○五十嵐啓大（筑波大院），松本聡（JAXA），金子暁子，阿部豊（筑波大）



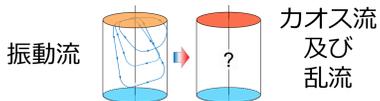
■ 研究背景

表面張力の温度依存性



■ 既存研究

Matsugase *et al.* (2015)



カオス解析を用いた
マランゴニ対流の非線形性解析

空間的な温度場での遷移過程
の知見は少ない

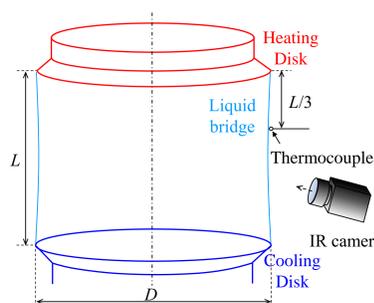
■ 研究目的

液柱マランゴニ対流が振動流から
カオス流へと遷移する過程の解明

■ アプローチ

- 表面温度 ⇒ 熱電対, IRカメラ
- 時間の複雑性 ⇒ 周波数解析, カオス解析
- 時空間の複雑性 ⇒ 固有直交分解 (POD)

■ 実験装置



International space station (ISS)



Disk size

- ディスク直径 D : 50 mm
- 液柱高さ L : 25 mm
- アスペクト比 $AR (=L/D)$: 0.5
- 体積比 $VR (=V/(\pi D^2 L/4))$: 0.95

マランゴニ数 Ma

$$Ma = \frac{\sigma_T \Delta T L}{\rho \nu \alpha}$$

表面張力 / 粘性力

過臨界パラメータ ϵ

$$\epsilon = \frac{Ma - Ma_{cr}}{Ma_{cr}}$$

$$Ma_{cr} = \frac{\sigma_T \Delta T_{cr} L}{\rho \nu \alpha}$$

ΔT_{cr} : 臨界温度差
 Ma_{cr} : 臨界マランゴニ数

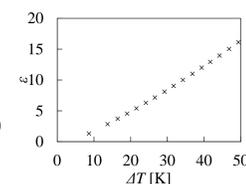
試験流体

5cSt silicone oil (KF96L-5CS)

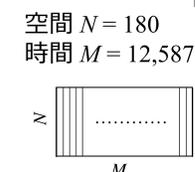
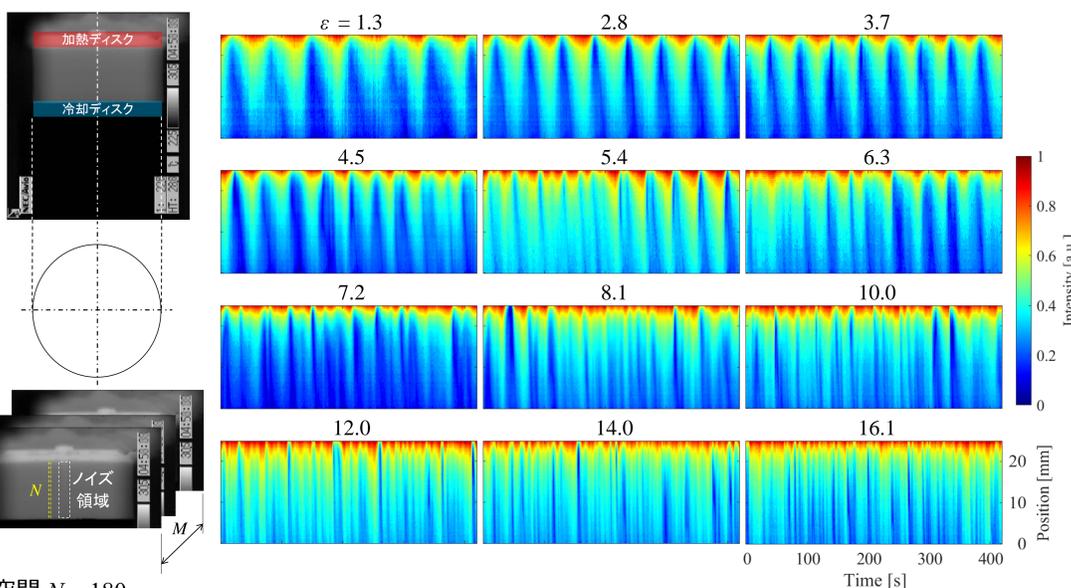
Density ρ [kg/m ³]	915
Kinematic viscosity ν [m ² /s]	5×10^{-6}
Temperature coefficient of surface tension σ_T [N/(m·K)]	6.58×10^{-5}
Thermal diffusivity α [m ² /s]	7.46×10^{-8}
Prandtl number [-]	67

温度条件

- $T_H = 28.6 \sim 69.4$ °C
- $T_C = 20$ °C (const)
- $\Delta T = T_H - T_C$
- $\Delta T_{cr} = 3.9$ °C ($AR = 0.5$)
- $\epsilon = 1.3 \sim 16.1$

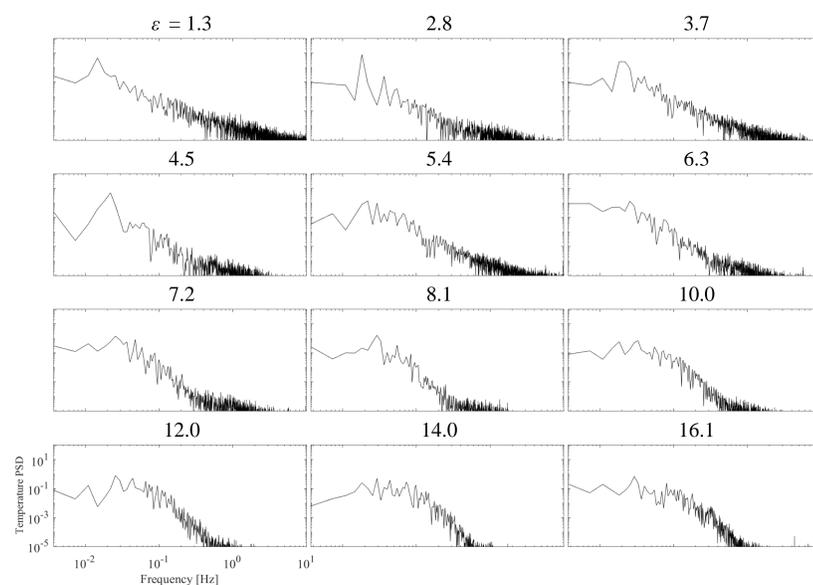


■ 時空間温度分布



- ϵ が大きくなるほど振動数が上昇
- ϵ が4.5付近までは周期的な波形
- ϵ が8.1以降はカオスの挙動を示している

■ 周波数特性 空間平均PSD

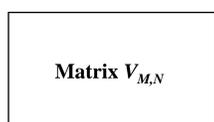


- ϵ が小さいときはメインの周波数ピークが卓越している
- ϵ の上昇に伴い、高次の周波数強度が上昇してくる
- ϵ が8.1より大きくなると、ブロードな周波数特性となる

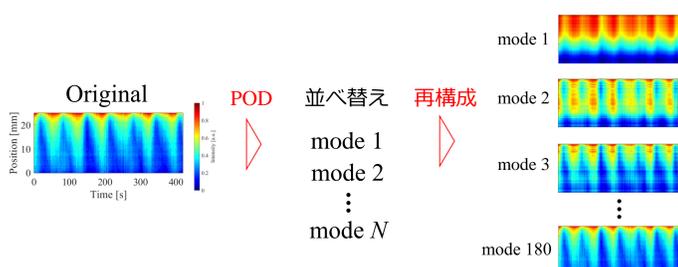
■ 固有直交分解

行列に含まれる成分の大きさ, 構造, 時間変動を取り出す

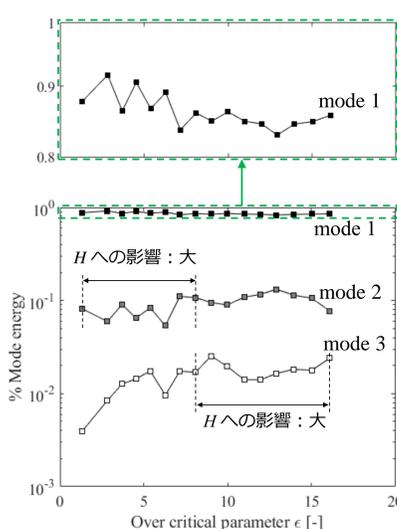
$$M (\text{時間}) \times N (\text{空間}) = V_{M,N}$$



- $V_{M,N}$ の時間平均 \bar{v}_i を求める ($i=1, \dots, N, j=1, \dots, M$)
$$\bar{v}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M V_{ij}$$
- $V_{M,N}$ と \bar{v}_i の差分 U_{ij} を求める
$$U: U_{ij} = V_{ij} - \bar{v}_i$$
- 共分散行列 C を求める
$$C = U^t U / M$$
- C の固有値 $\{e_i\}_{i=1 \dots N}$ と固有ベクトル $\{f_i\}_{i=1 \dots N}$ を算出
- 固有値を降順に並べ替え, 大きいモードからモード1, モード2 とする ($e_1 > e_2 > \dots > e_N$)



■ 温度分布の各成分の占有率



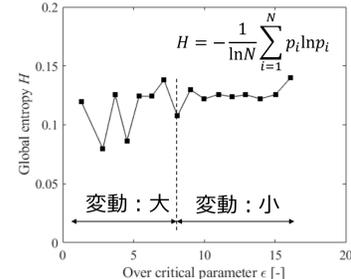
Takeda (1999)

$$p_i = \frac{e_i}{\sum_{i=1}^N e_i}$$

e_i : mode i
 N : e_i の総数
 p_i : mode i の占有率

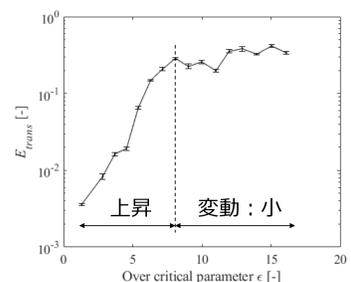
- 全 ϵ の範囲において mode 1 が卓越している
- mode 2, mode 3 の挙動は $\epsilon = 8.1$ を境に H の変動とおおよそリンクしている

■ 時空間温度分布の複雑性



- $\epsilon = 1.3 \sim 8.1$ 付近までは変動が大きく, 周波数ピークを示した ϵ では H が小さい
- ϵ が9.0以降は変動が小さく, H が高い値で推移

■ 時系列温度の非線形性



- $\epsilon = 1.3 \sim 8.1$ まで E_{trans} は上昇し, それ以降の変化は小さい

→ ϵ が 1.3 から 8.1 にかけてカオス流・乱流へ遷移

■ 結言

液柱の軸方向の空間データから時空間温度分布を取得し, 温度分布の複雑性をグローバルエントロピー H を用いて定量的に評価

- ✓ 時空間温度分布は ϵ が8.1以降でカオスの挙動を示した
- ✓ H は $\epsilon = 1.3 \sim 8.1$ で変動が大きく, それ以降の変動は小さい

→ ϵ が8.1を超えると, 発達したカオス流と考えられる

参考文献

- [1] A. Cro'Il, W. Mu'ller-Sebert, and R. Nitsche: J.Crystal Growth, **79** (1986) 65.
- [2] T. Matsugase, I. Ueno, K. Nishino, M. Ohnishi, M. Sakurai, S. Matsumoto and H. Kawamura: Int. J. Heat Mass Transfer, **89** (2015) 903.
- [3] Y. Takeda, Journal of fluid mechanics, **389** (1999) 81.