

簡易コイル構造内の 冷却液分布の可視化

大阪府立大学 金田昌之



近年の自動車電動化

(自動車用動力伝達技術研究組合 (TRAMI))



↓
モーターの高出力化と小型化

↓
モーター発熱密度の増大・温度の上昇 (減磁等の問題)

効率的な除熱
が必要

現状：ATFをノズルから流下して発熱部 (ステータコイル) を冷却
液体挙動は不明，複数ノズル穴などで試行錯誤？

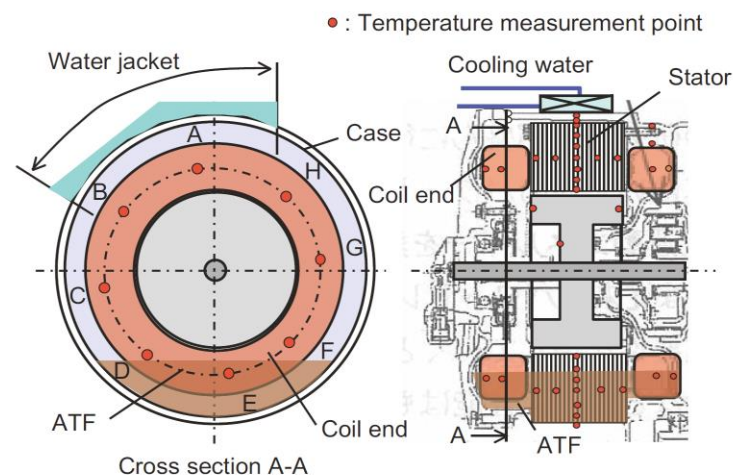
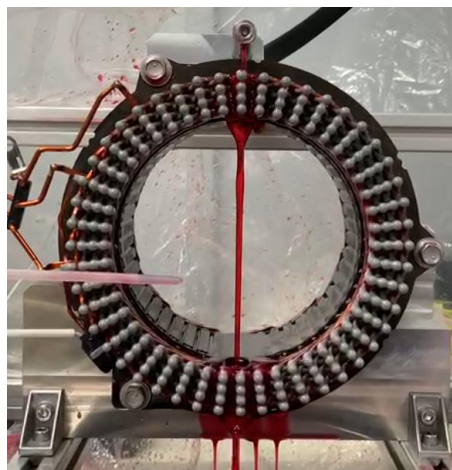


Fig. 4 Motor for evaluation to measure temperature distribution

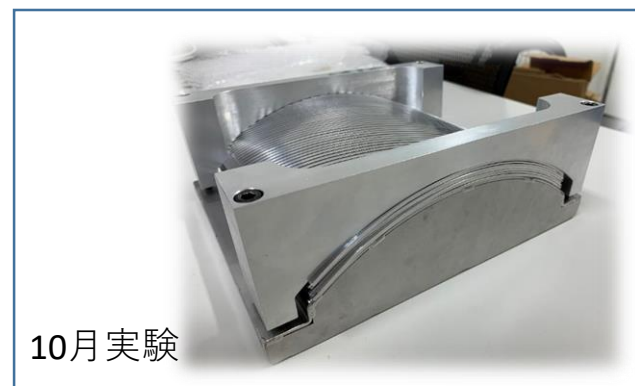
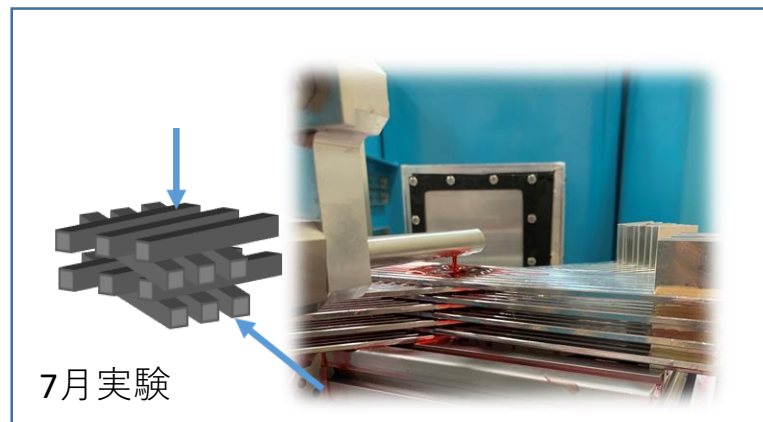
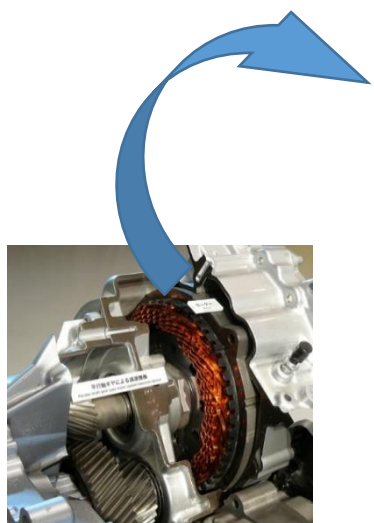
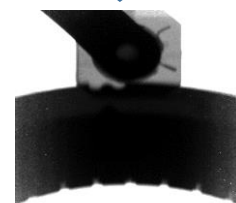
現象の解明と最適化のための知見の収集



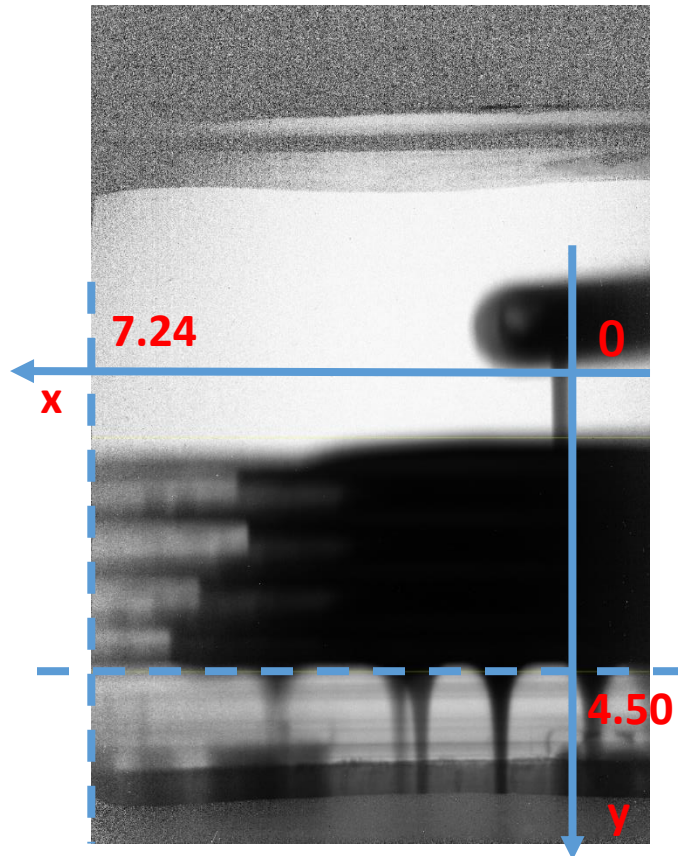
実機の材質では中性子減衰が大きく構造内の可視化不可能



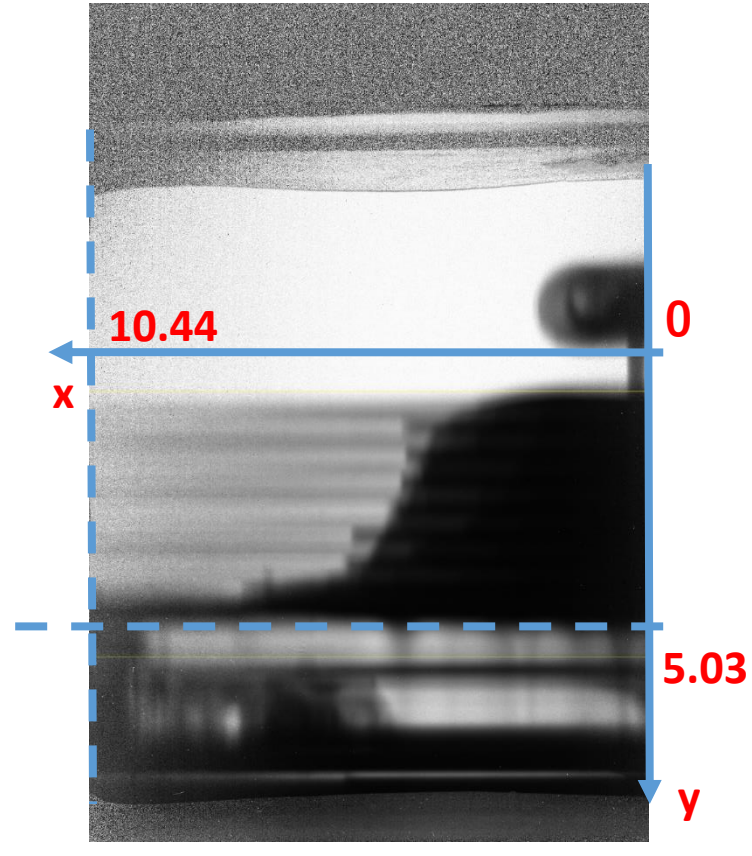
ノズル直下の構造をアルミで作成して流動可視化
(7月, 10月)



- 期間：2021年7月27日（1MW）， 7月28日（1MW）， 7月29日（5MW）
- 場所：京都大学複合原子力科学研究所（大阪府泉南郡熊取町）
- 人数：3名（金田， 杉本， 李）
- 実験対象：アルミ角棒積層構造
- 実験条件
 - 温度：20°C， 30°C
 - 流量：500mL/min
 - 角棒間隔：1mm， 0.75mm
 - 撮影方向， 領域：水平1方向， 半分（中心から30mmオフセット）



0.75mmにおけるATFの分布
スケール:24.13pixel/mm



1mmにおけるATFの分布
スケール:19.43pixel/mm

$$L_{ATF} = \left[-\ln\left(\frac{I_{ATF+Al}}{I_{empty}}\right) - \left(n * \frac{d}{\cos(22.5^\circ)} * \mu_{Al}\right) \right] / \mu_{ATF}$$

$$V_{pixel} = L_{ATF} \times L^2_{pixel}$$

$$V_{pixel} = \left[-\ln\left(\frac{I_{ATF+Al}}{I_{empty}}\right) - \left(n * \frac{d}{\cos(22.5^\circ)} * \mu_{Al}\right) \right] / \mu_{ATF} \times L^2_{pixel}$$

L :ATFの濡れ厚み[cm]

V_{pixel} : 単位ピクセルの体積[cm³]

$-\ln\left(\frac{I_{ATF+Al}}{I_{empty}}\right)$: アルミとATFの合計の減衰の値

n : 本数

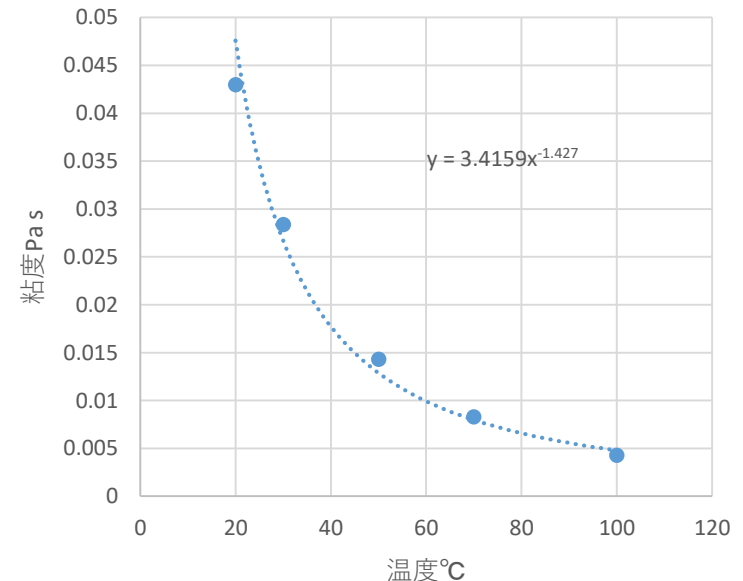
$\frac{d}{\cos(22.5^\circ)}$: 照射方向の厚み[cm]

μ_{Al} : アルミの減衰係数[/cm]

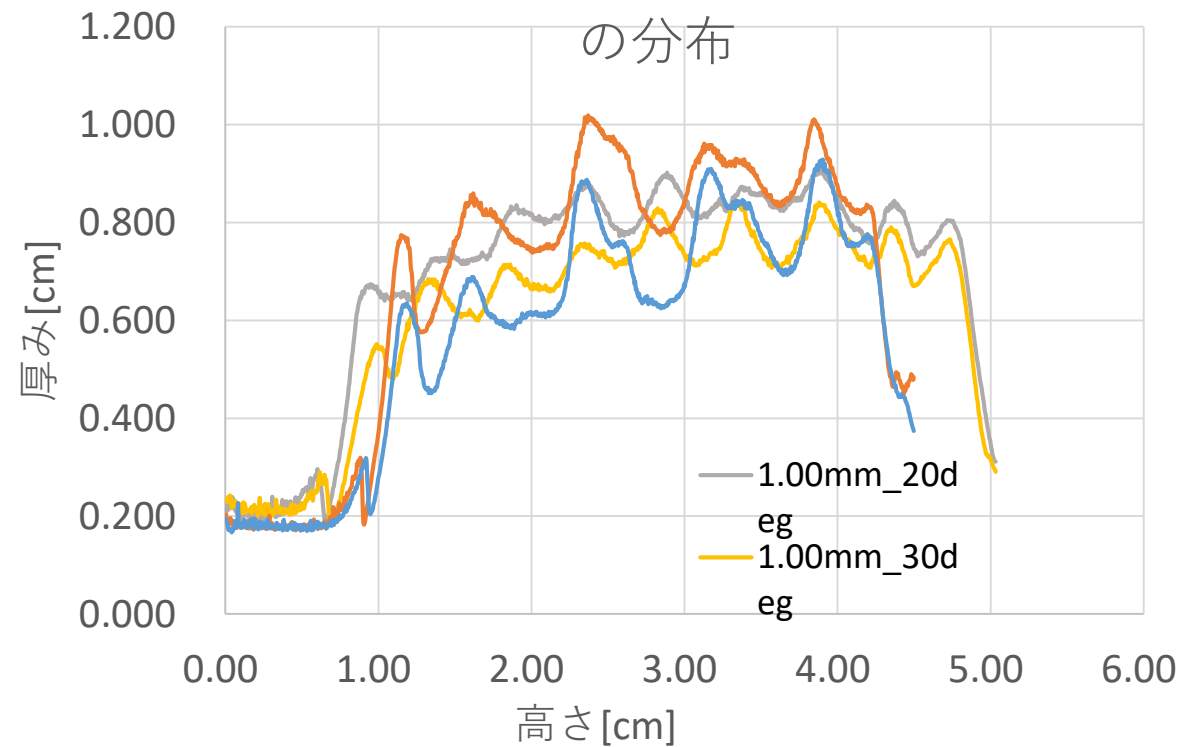
μ_{ATF} : ATFの減衰係数[/cm]

L^2_{pixel} : ピクセルの面積[cm²]

粘度の温度依存性



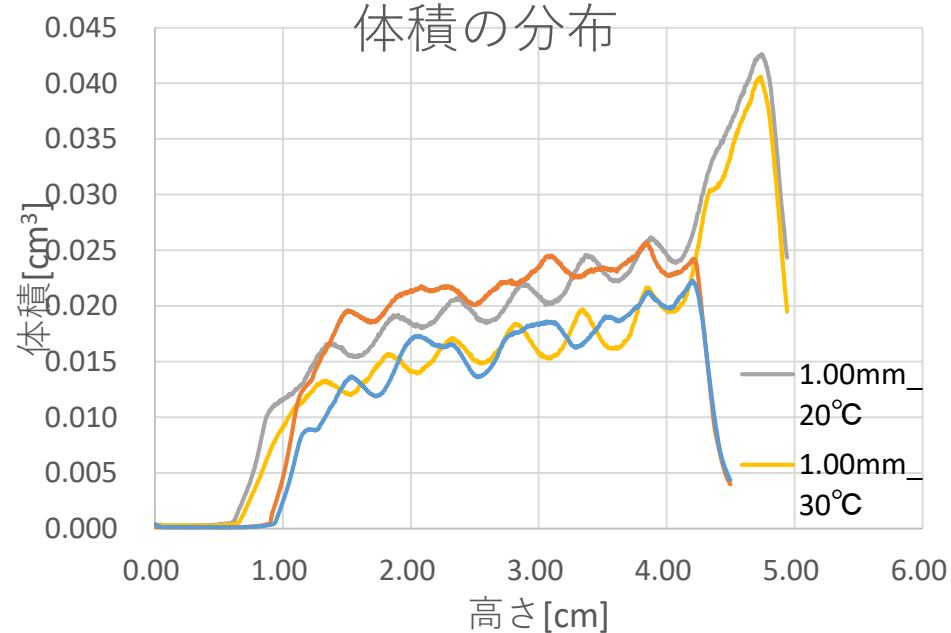
積層構造における y 方向平均濡れ厚みの分布



公式に含まれるアルミの影響により
隙間の厚みは0.15cmの程度小さくなる

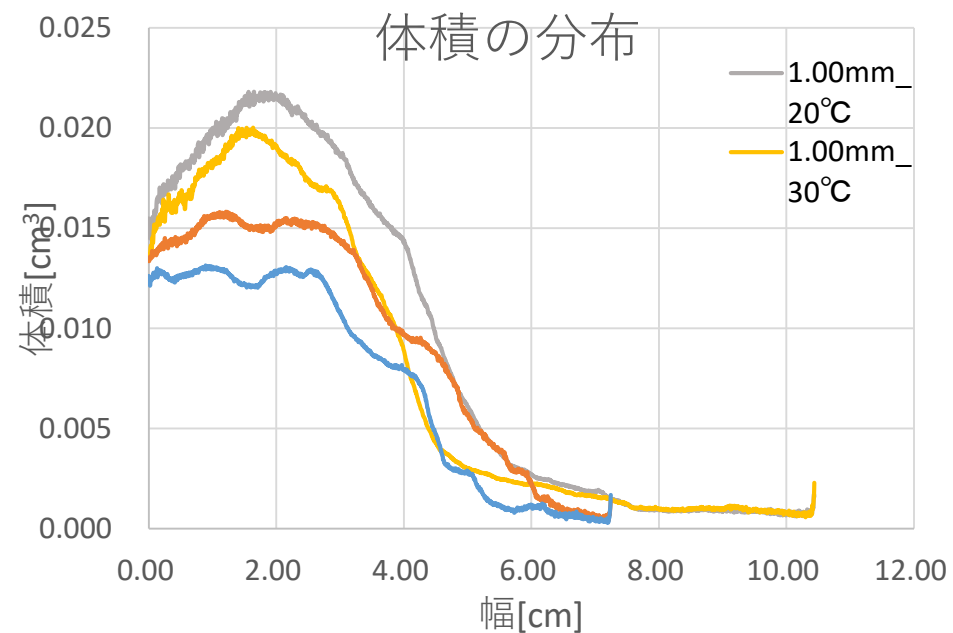
積層構造における y 方向に濡れ

体積の分布



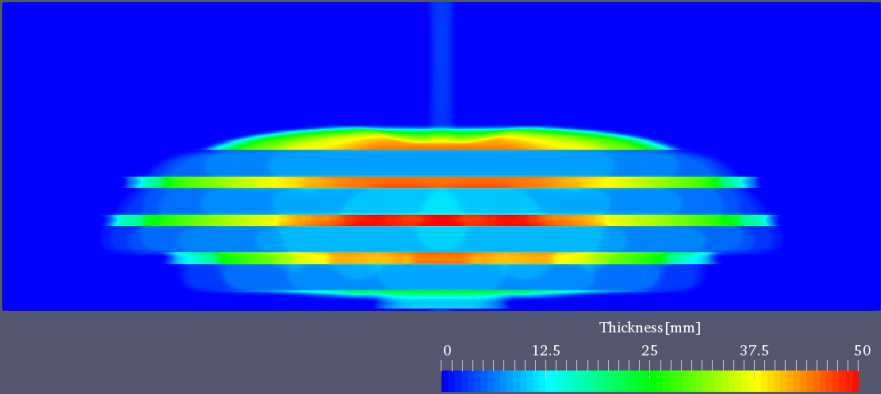
積層構造における x 方向に濡れ

体積の分布

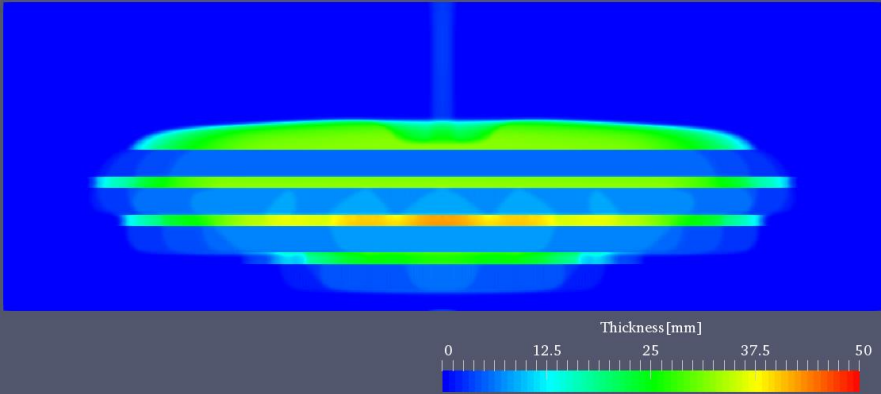


ATFの厚み分布（4層コイル）

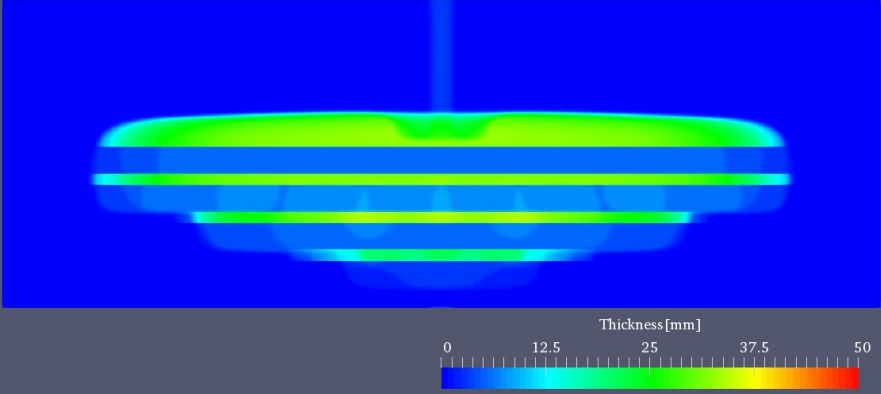
$Gap = 1\text{ mm}$ $\theta = 30^\circ$



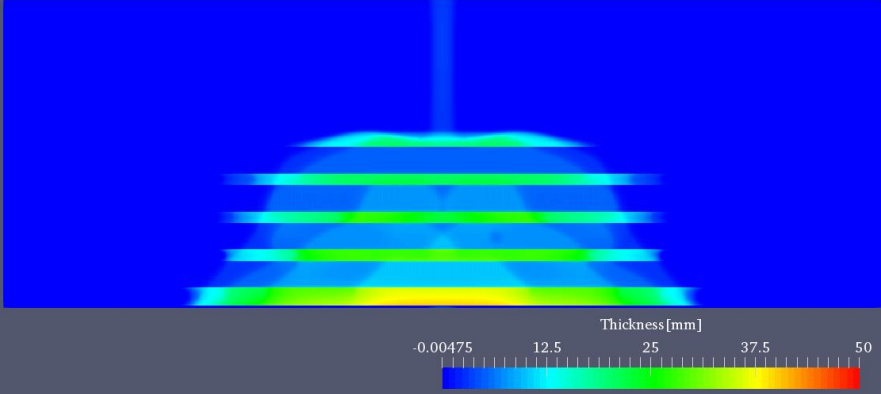
$Gap = 1\text{ mm}$ $\theta = 60^\circ$



$Gap = 1\text{ mm}$ $\theta = 90^\circ$



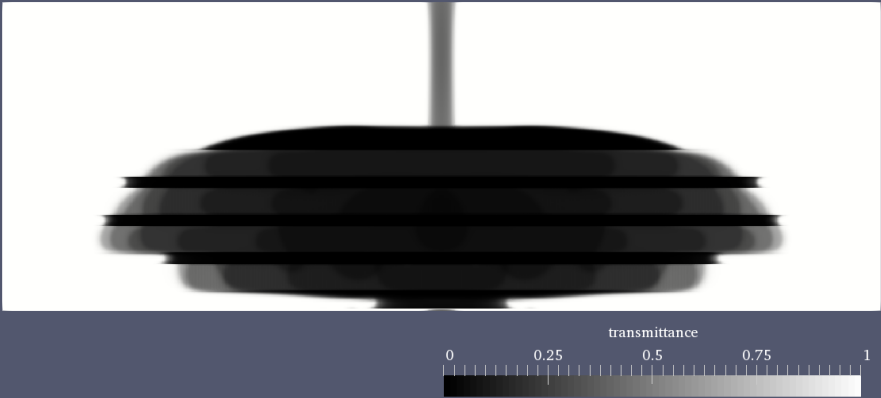
$Gap = 2\text{ mm}$ $\theta = 30^\circ$



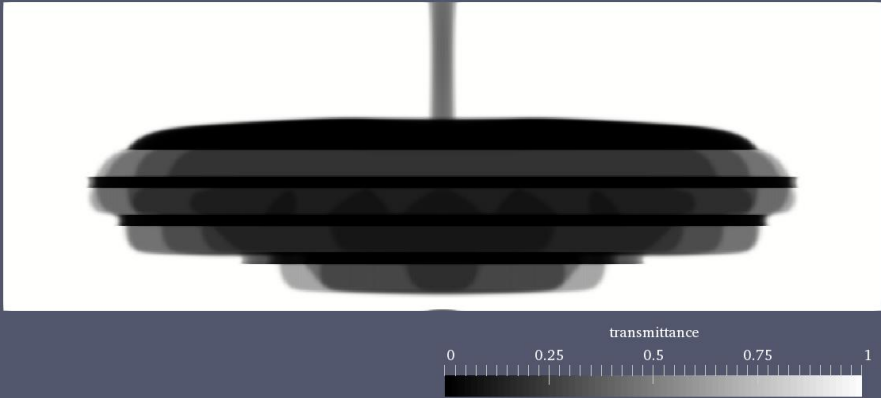
ATFの厚み分布（4層コイル）

$$T = \exp(-\mu D)$$

$Gap = 1 \text{ mm}$ $\theta = 30^\circ$



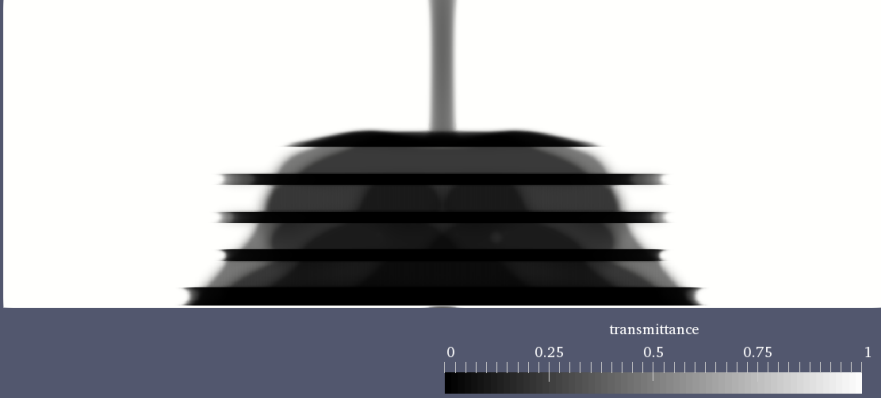
$Gap = 1 \text{ mm}$ $\theta = 60^\circ$



$Gap = 1 \text{ mm}$ $\theta = 90^\circ$



$Gap = 2 \text{ mm}$ $\theta = 30^\circ$



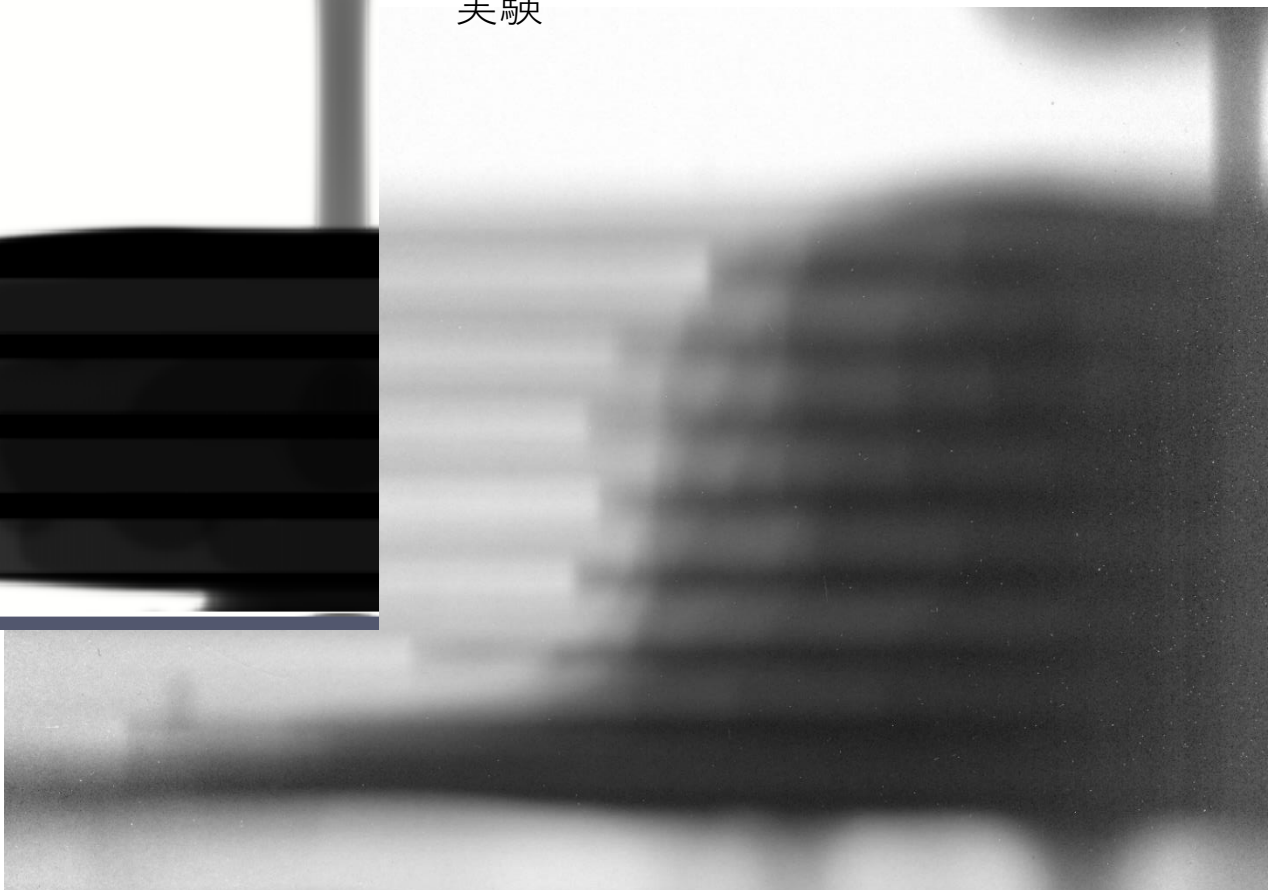
ATFの厚み分布（4層コイル）

$$Gap = 1 \text{ mm} \quad \theta = 30^\circ$$

解析

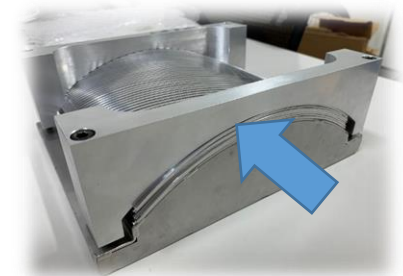


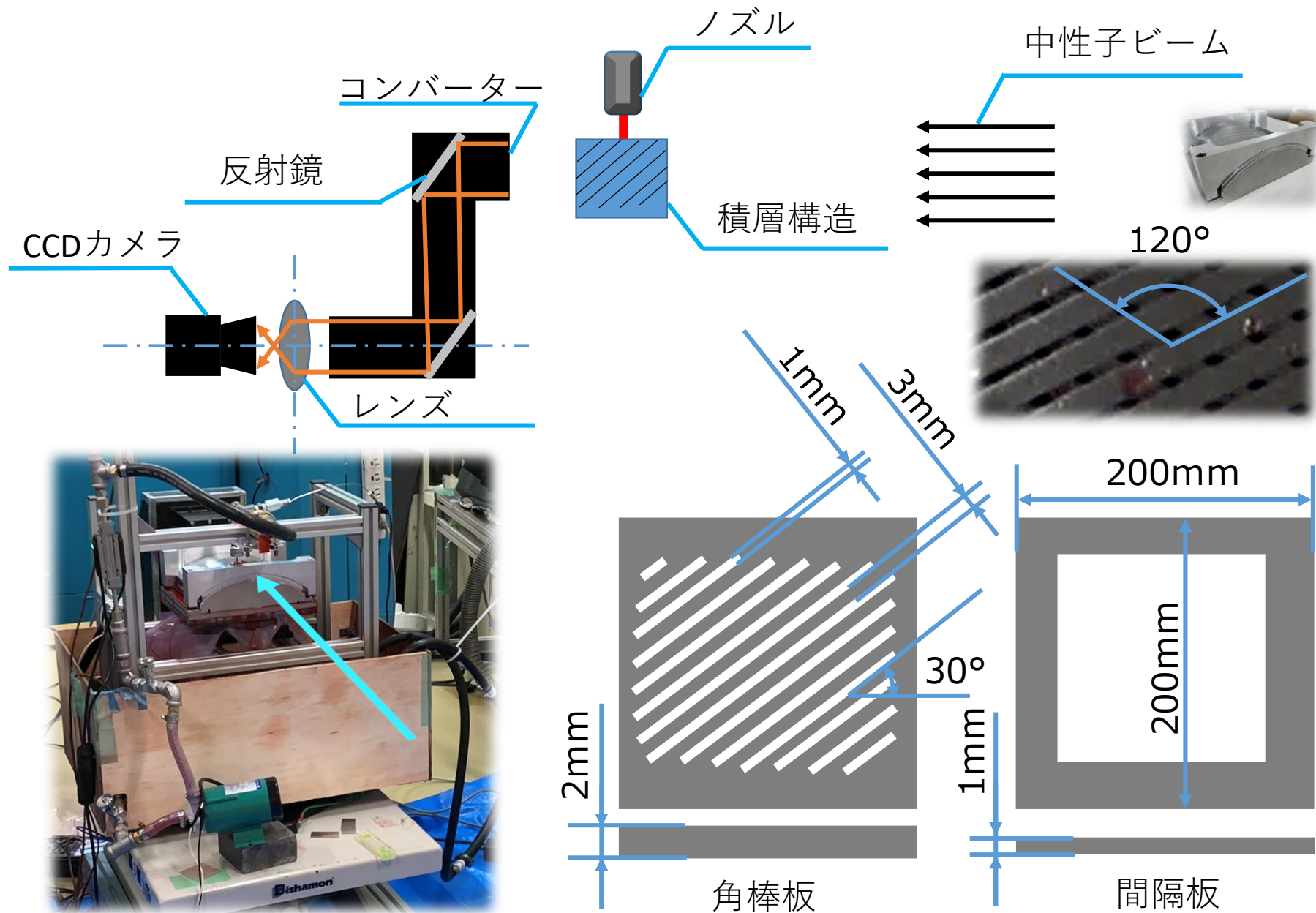
実験



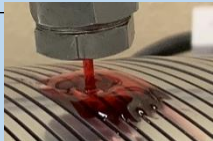
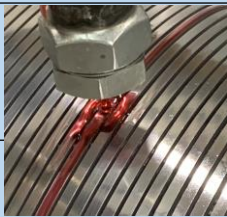
層の数は異なるが、中性子ラジオグラフィー実験と解析結果を液体厚さで比較できる。濡れ性も異なるので、今後表面処理したアクリルでの比較を実施する

- 実施日：10月26日（火）12:00頃搬入開始～
10月28日（木）15:00撤収
- 場所：京都大学複合原子力科学研究所
（大阪府泉南郡熊取町）レンタカーにて移動
- 実施人数：3名（金田，杉本，李）
- 実験内容：右下図構造のATF流下実験
- 実験条件：温度（20℃，30℃，40℃，50℃）
流量（0.5L/min，0.65L/min）





実験パラメータ

隙間 [mm]	流量[ml/min]	温度 [℃]	上面の濡れ本数
1	500	20	7 
		30	6 
		40	4 
		55	3 
	650	30	5
		40	4
		55	3

実験パラメータ

隙間 [mm]	流量 [ml/min]	温度 [℃]	上面の濡れ 本数
1	500	20	7
		30	6
		40	4
		55	3
	650	30	5
		40	4
		55	3

$$\eta = \frac{I_0 e^{-\mu_{ATF} d_{ATF} - \mu_{Al} d_{Al} - \mu_{Air} d_{Air}}}{I_0 e^{-\mu_{Al} d_{Al} - \mu_{Air} d_{Air}}}$$

$$V_{pixel} = -\ln(\eta) / \mu_{ATF} \times L^2_{pixel}$$

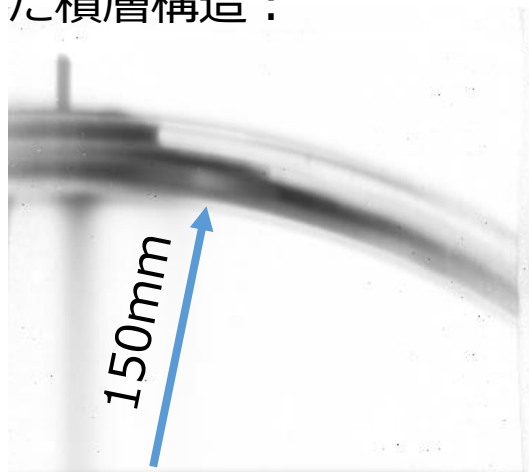
V_{pixel} : ピクセルごとATFの体積[mm³]

d_x : 照射方向の物質の厚み[mm]

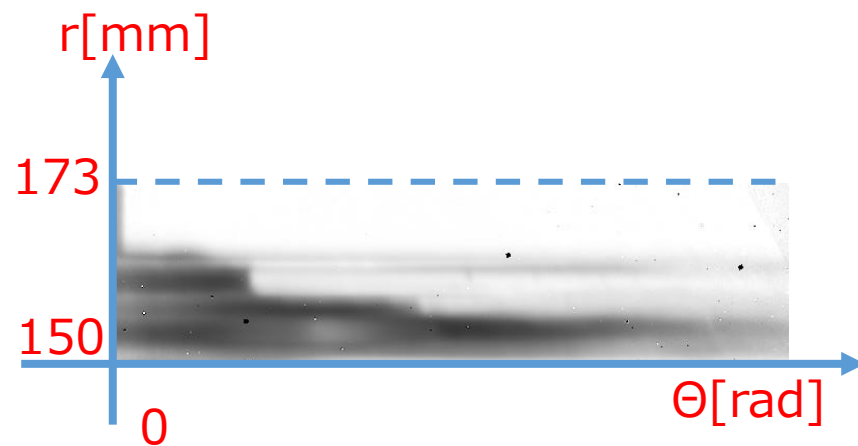
μ_x : 物質の減衰係数[/mm]

L^2_{pixel} : ピクセルの面積[mm²]

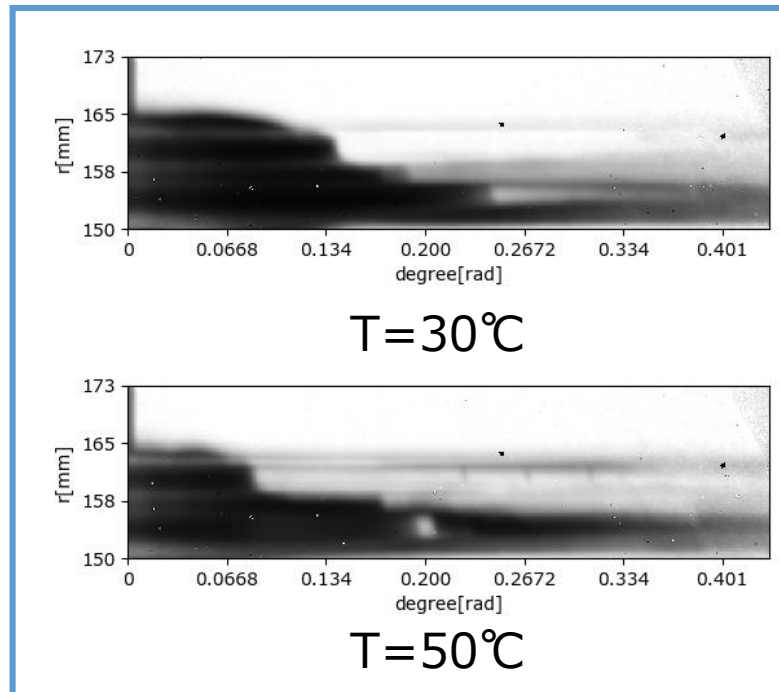
曲がった積層構造：



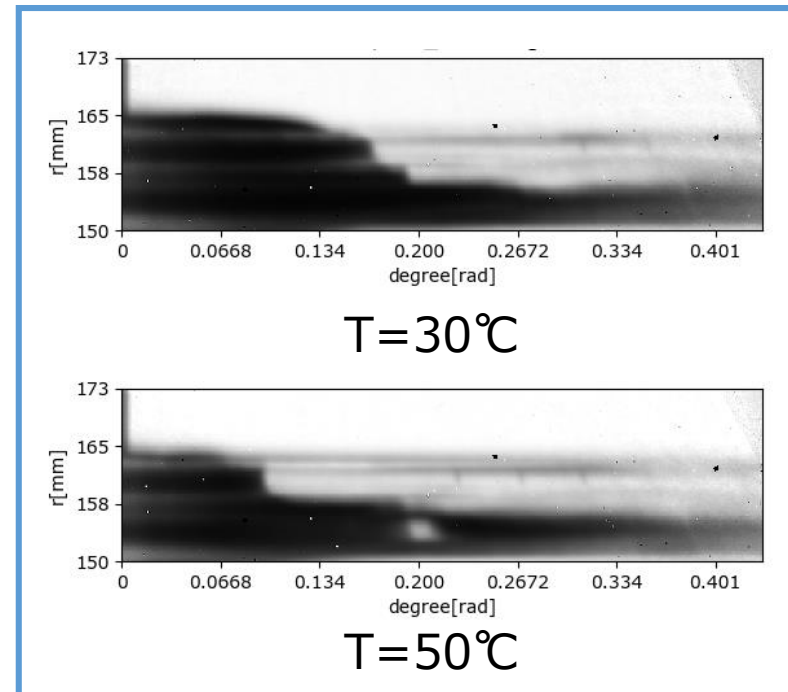
X-Y座標



極座標



$Q=500\text{ml/min}$



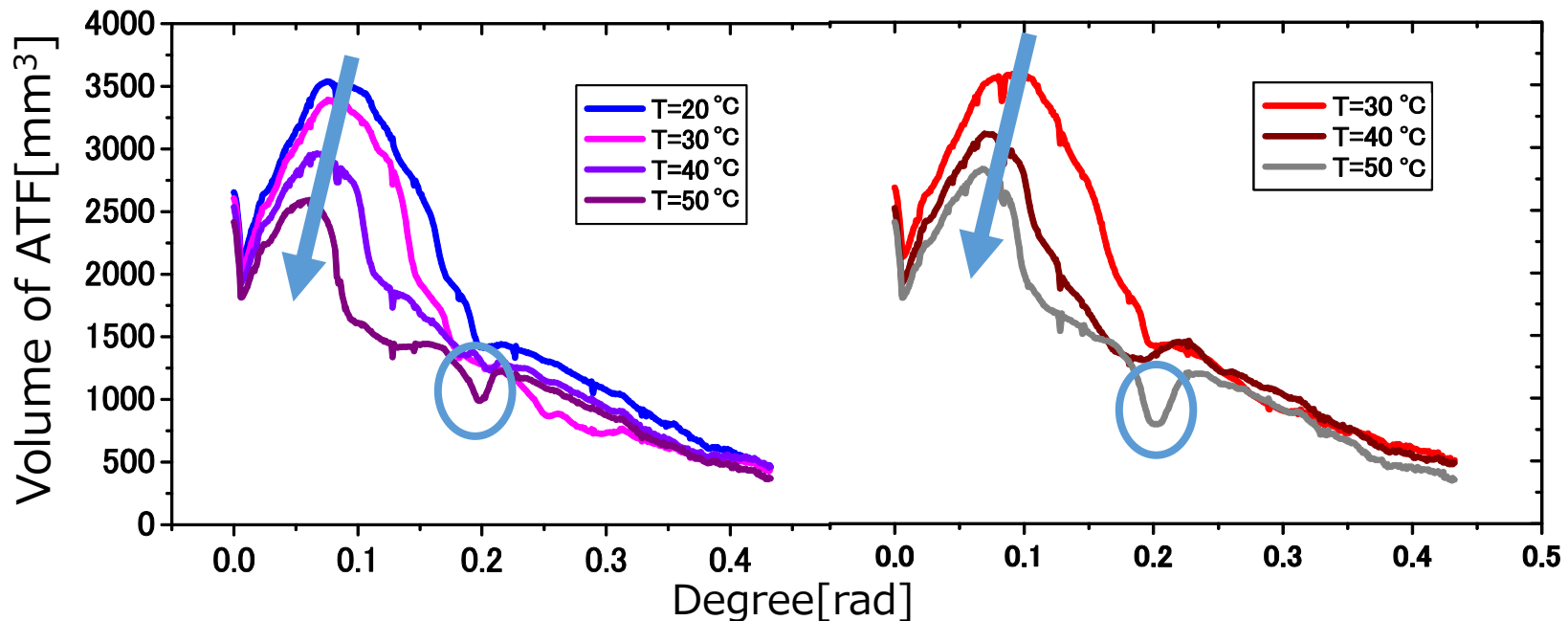
$Q=650\text{ml/min}$

温度一定:

- 流量の増加に伴い、円周方向へ濡れ広がった

流量一定:

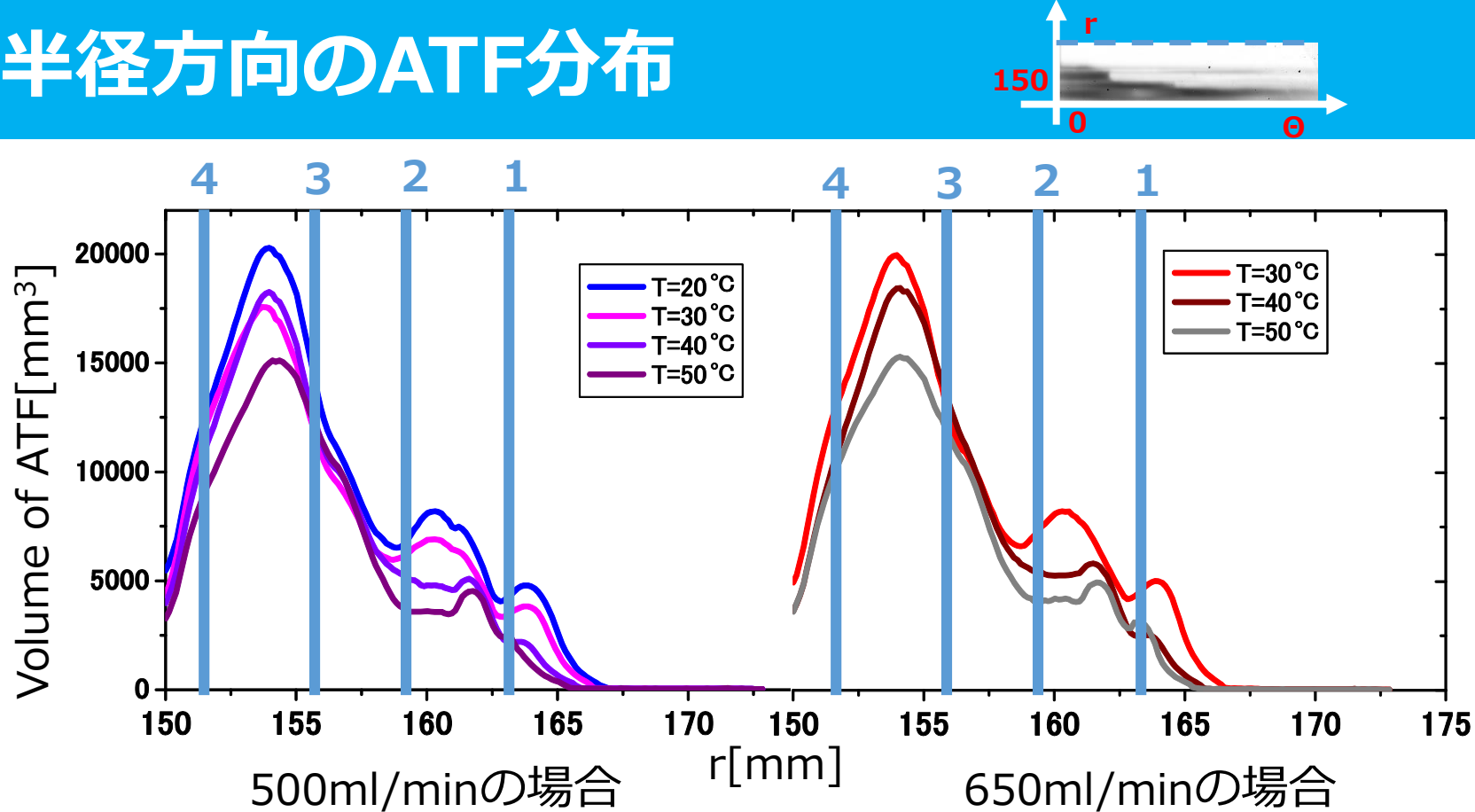
- 温度の上昇に伴い、円周方向の濡れ幅が縮んだ
- 一層目の上に溜まったATFは少なくなった
- 最低層上の隙間部分に空隙が出現



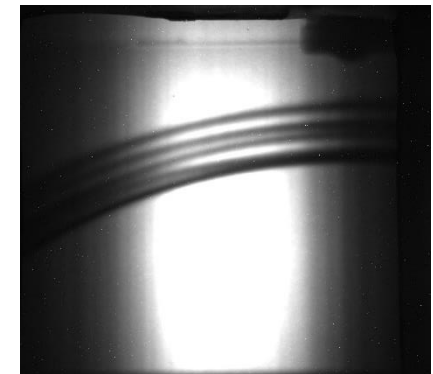
500ml/minの場合

650ml/minの場合

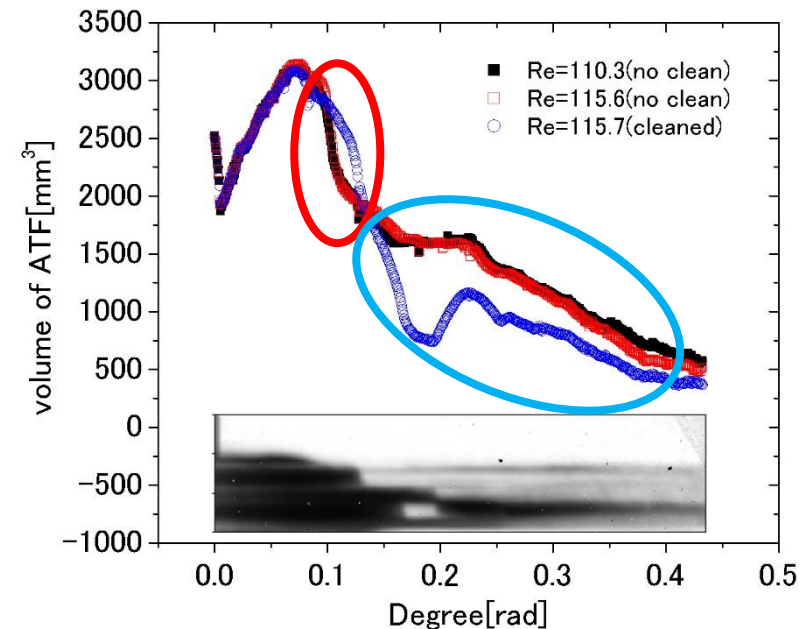
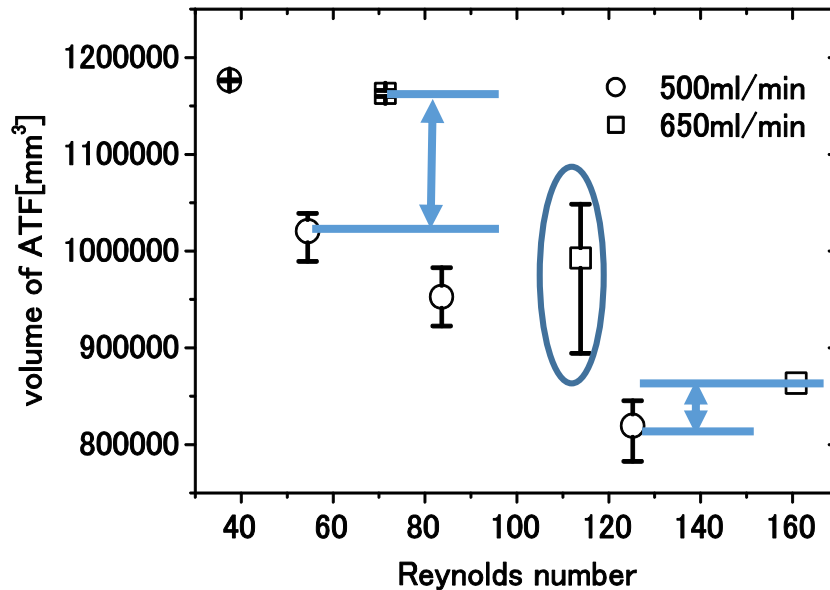
- 温度の増加とともに、ピーク値は左下になった
- 粘度が低下するに伴い、流下しやすく、濡れ広がり範囲は縮んだ
- 50℃の場合にいずれ流量でも空隙が存在
- 粘度の低下,抵抗が下がるので、
四層目上のATFはあまり濡れ広がらずに流下



- 20℃と30℃の場合に濡れ広がり方は相似
 - 粘性係数はより高いため、濡れ広がり方は似てる一方で、40℃と50℃の場合により低いため、濡れ体積分布と溜まる量は変わった
- 二層目と三層目の間に同じな濡れ体積になった
 - 応力により、二層目と三層目の隙間は狭いので、濡れ体積のピーク値はなくなった



空状態の実験構造



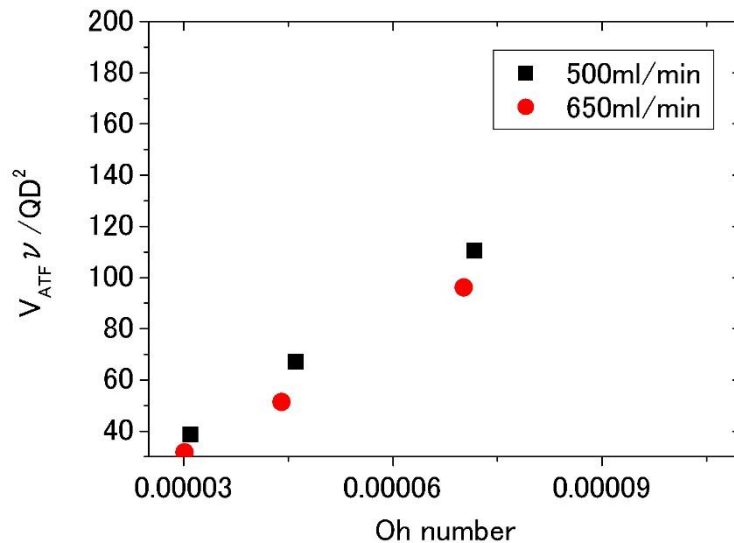
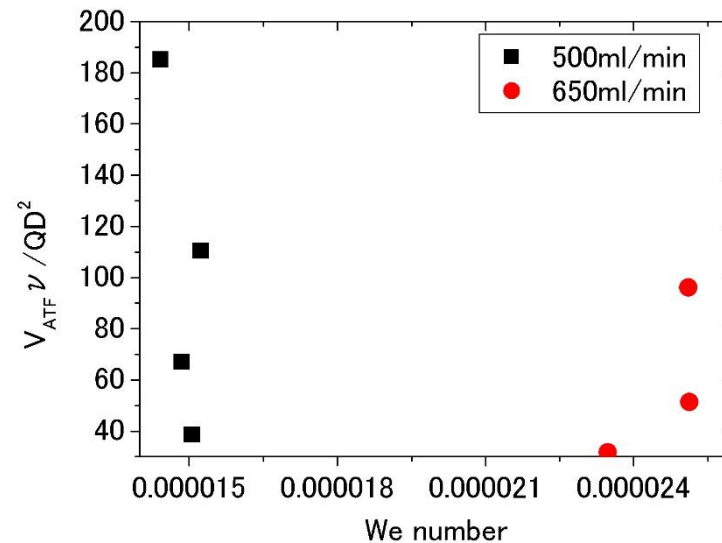
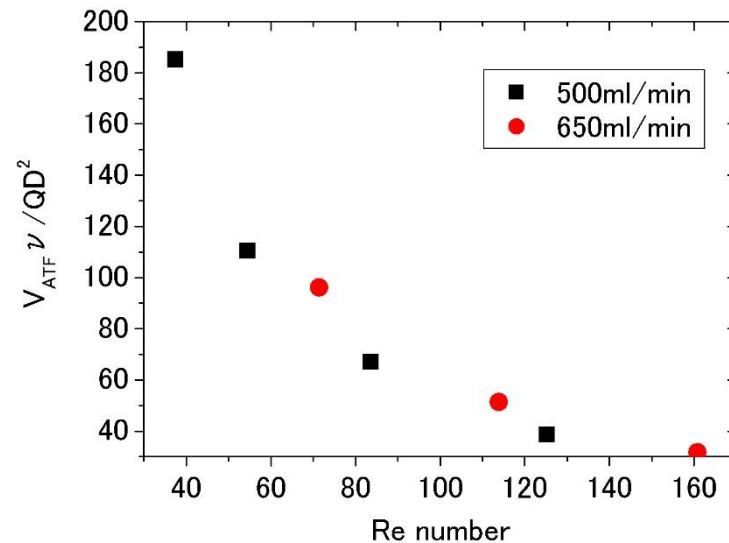
同じな温度:

- 流量が増加すると、体積増加量が減少

同じな流量:

- 温度の上昇に伴い、ATFの粘度が低くなるので、流下しやすく、溜まる量は減少

- ATFは主流に詰まるが、空隙から濡れ広がるATFはより少ない
- 全体としては濡れ体積がより低い



$$Re = \frac{uD}{\nu}$$

$$We = \frac{\rho Du^2}{\sigma}$$

$$Oh = \sqrt{\frac{\rho \nu^2}{L\sigma}}$$

u : 流速[mm/s]

Q : 流量[mm³/s]

D : 代表長さ[mm]

ρ : 密度[kg/mm³]

σ : 表面張力[N/mm]

ν : 動粘度[mm²/s]

V_{ATF} : 残ったATF量[mm³]

- 自動車用モータのステータコイル部，冷却液（ATF）流下箇所を簡易的に模擬した構造を作成，内部の液体分布を可視化
- 水平角柱積層構造・局面を有する構造で実験
- 温度依存の構造内液体分布を整理
- 来年度：コイルのジュール熱加熱を模擬した実験ができれば...
- 謝辞：本研究の一部は自動車用動力伝（TRAMI）の援助を受けました。