

SP301 静電圧力効果と接触角変化による沸騰熱伝達の促進

第52回 日本伝熱学会シンポジウム

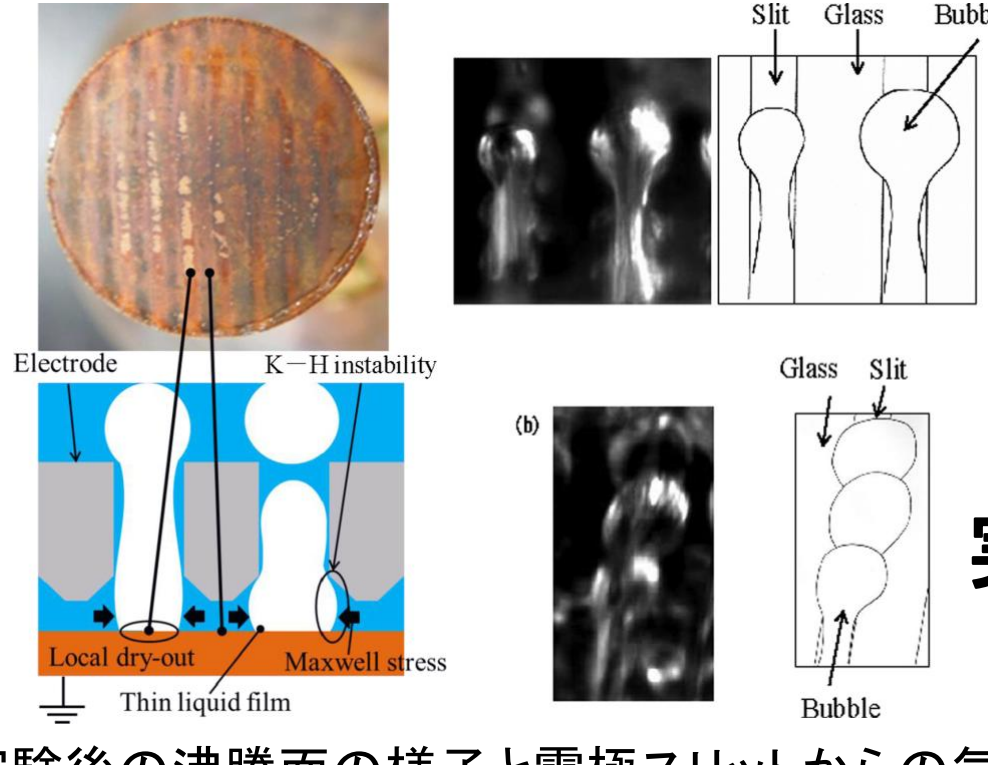
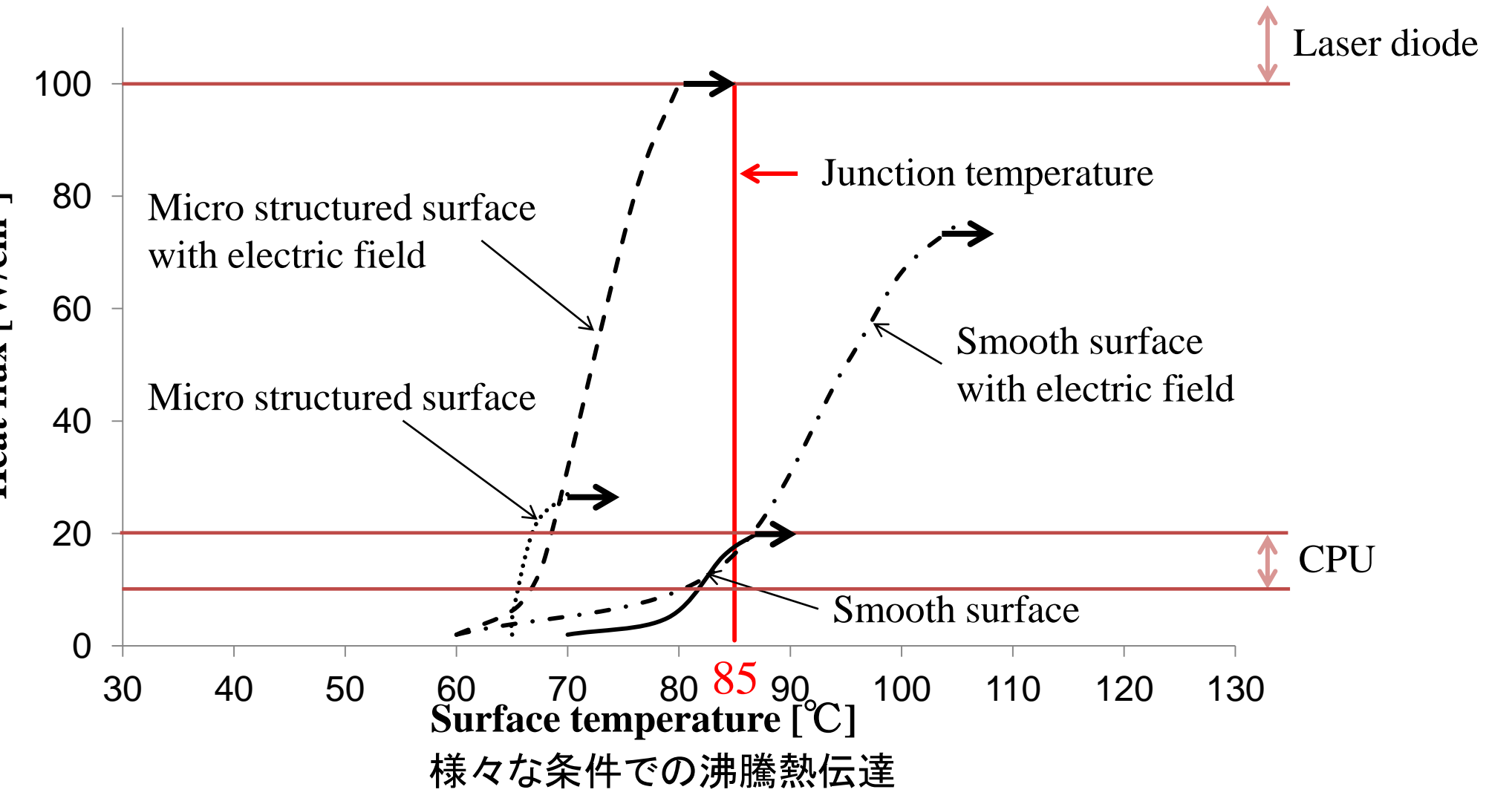
山形大学大学院理工学研究科: 岡本 直樹 佐藤 貴仁 鹿野 一郎

背景

電子機器の小型化・高性能化により発熱密度が上昇
→沸騰熱伝達を利用した冷却装置を開発

これまでの研究で、伝熱面にダイヤモンド粒子を電着し微細構造を設け、静電圧力の利用とフッ素系絶縁性液体AE-3000の使用で沸騰熱伝達を促進

- 電気的な力で加熱面への液体の供給及び気泡を排除
- 電子機器の発熱温度で沸騰(55.5°C)
- 電気絶縁性液体
- 耐腐食コーティング不要



次の内容を仮定
・電界印加により周期的に薄液膜を生成
・周期的な薄液膜を連続的に蒸発
→気液表面が $\lambda_0 = \pm W_e / 2$ で存在
・乱れた表面の波長 λ
幾何学的にHの長さの2倍に近い
→ $\lambda = 2H$ と仮定

実験の詳細な観察と結果から沸騰促進モデルを作成

実験後の沸騰面の様子と電極スリットからの気泡挙動 Kano I., (2014)

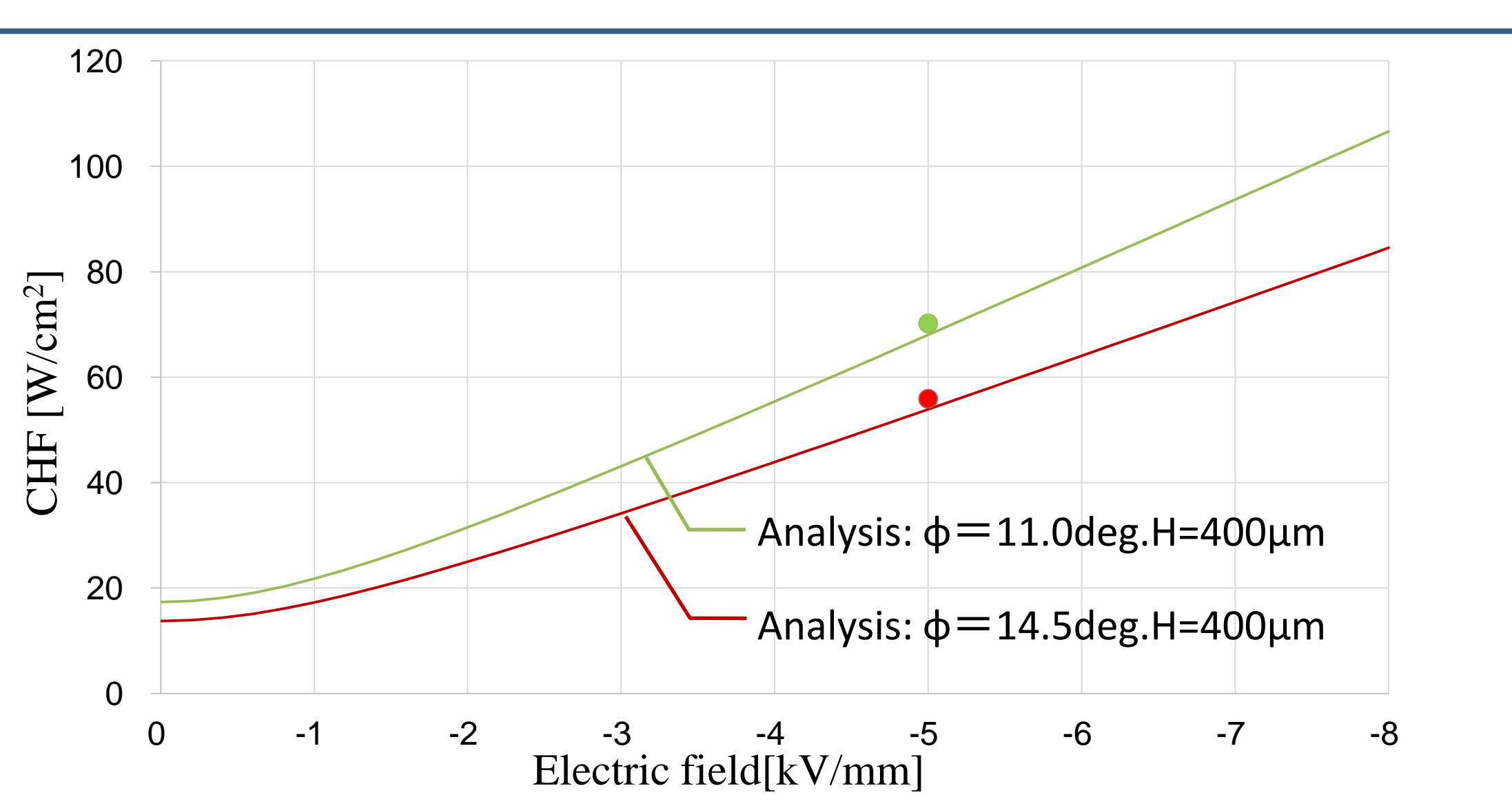
目的

沸騰熱伝達を利用することで不活性液体でも高い熱伝達率を得る

沸騰促進モデルの検証

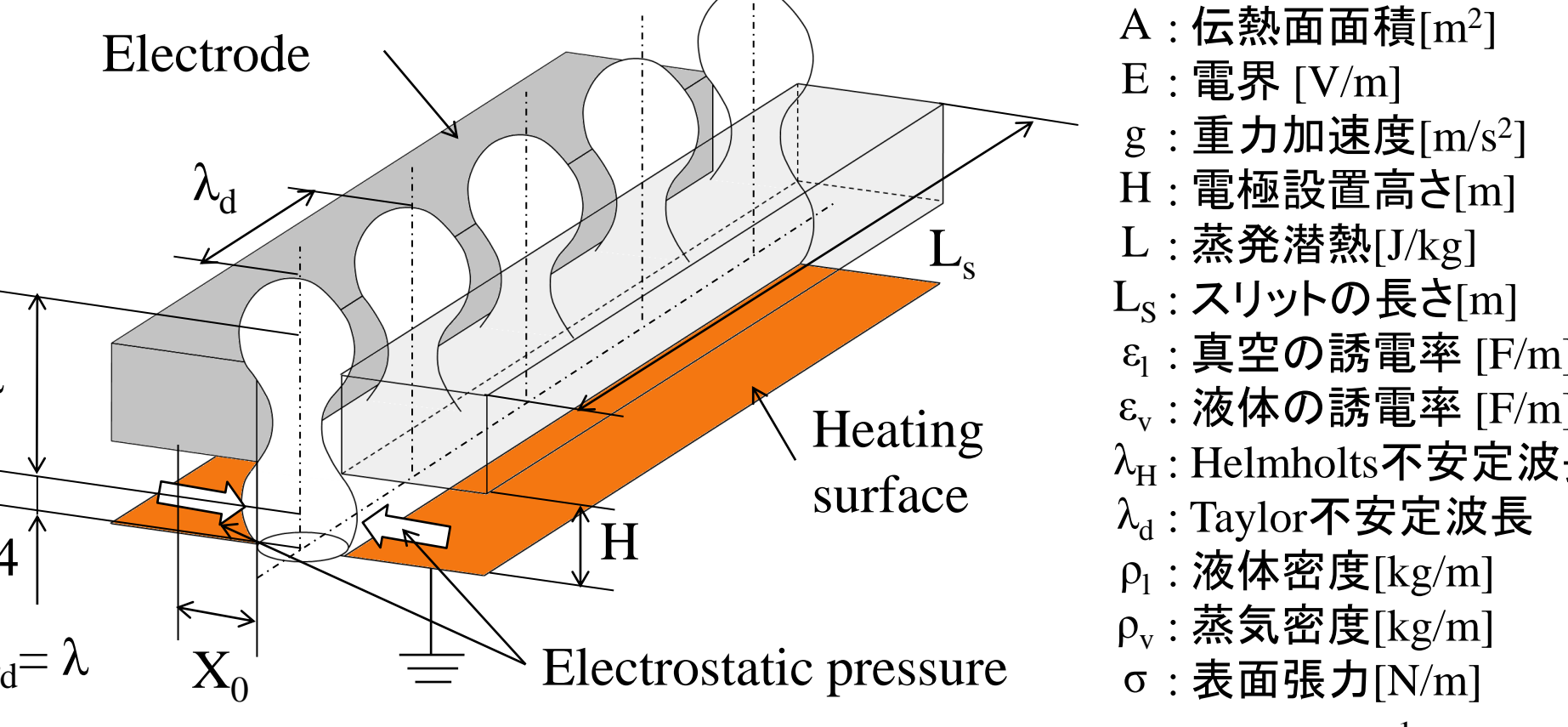
沸騰促進モデルを6つのパラメータで考慮 (接触角, 静電圧力, 電極高さ, 表面張力, スリット長, スリット幅)

- 接触角が熱流束に与える影響
- 静電圧力が熱流束に与える影響
- 電極高さ(表面張力)が熱流束に与える影響



原理

電界印加におけるCHF理論式 Kano et al (2014)

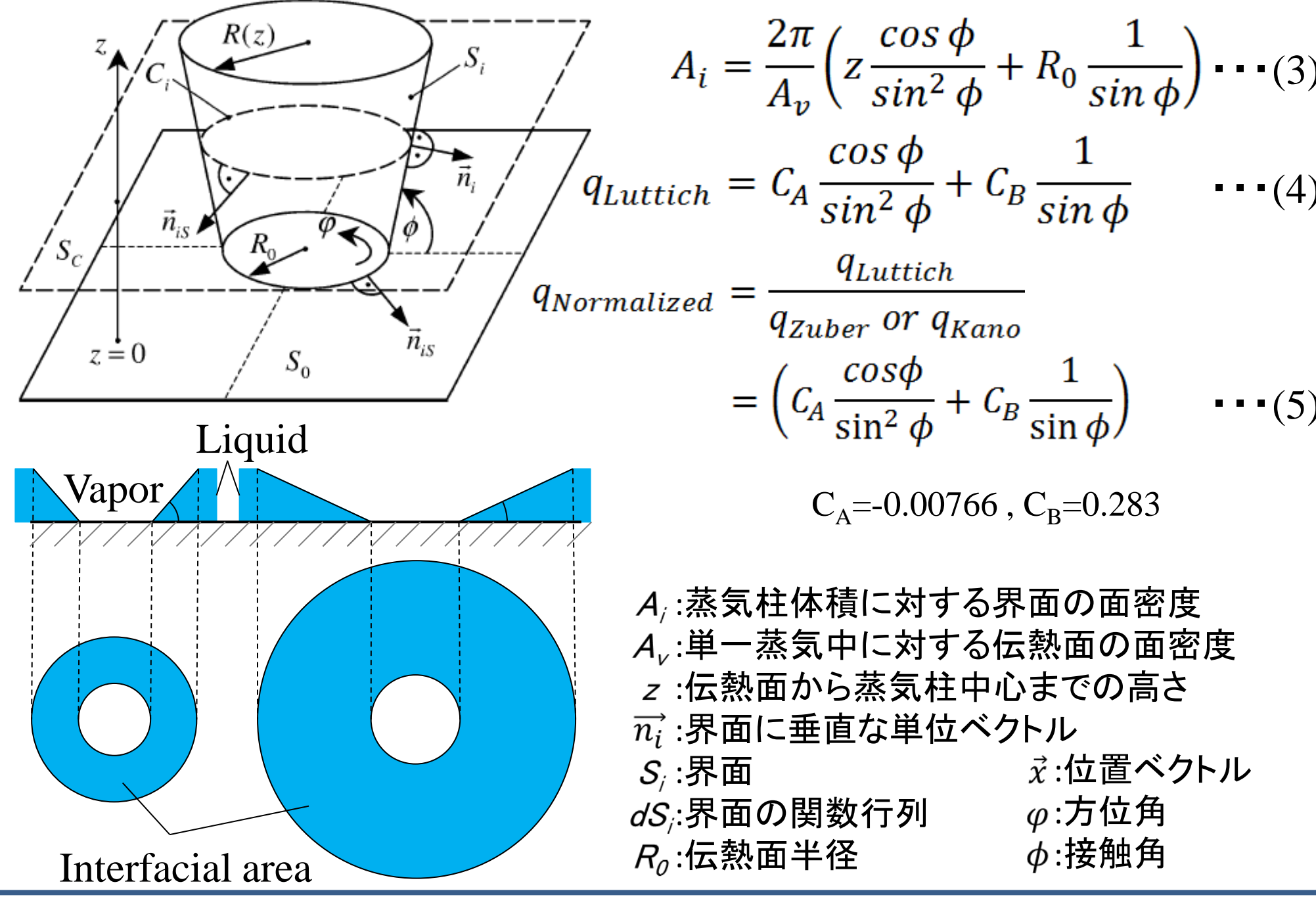


$$q_{Kano} = \frac{\pi \lambda L \rho_v L_s}{48 L \rho_v A} \left[\frac{\rho_v + \rho_l}{\rho_l \rho_v} \left\{ \frac{2\pi\sigma}{\lambda} + E^2 (\epsilon_l - \epsilon_v) \tanh \left(\frac{2\pi X_0}{\lambda} \right) \right\} \right]^{1/2} \dots (1)$$

電界印加を行わない(E=0)の場合

$$q_{Zuber} = \frac{\pi}{24} L \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \left[\frac{\rho_l + \rho_v}{\rho_l} \right]^{1/2} \dots (2) \quad \text{但し } \lambda = 2\pi \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}$$

薄液膜理論 Luttich et al (2004)



$$A_i = \frac{2\pi}{A_v} \left(z \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} + R_0 \frac{1}{\sin \phi} \right) \dots (3)$$

$$q_{Luttich} = C_A \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} + C_B \frac{1}{\sin \phi} \dots (4)$$

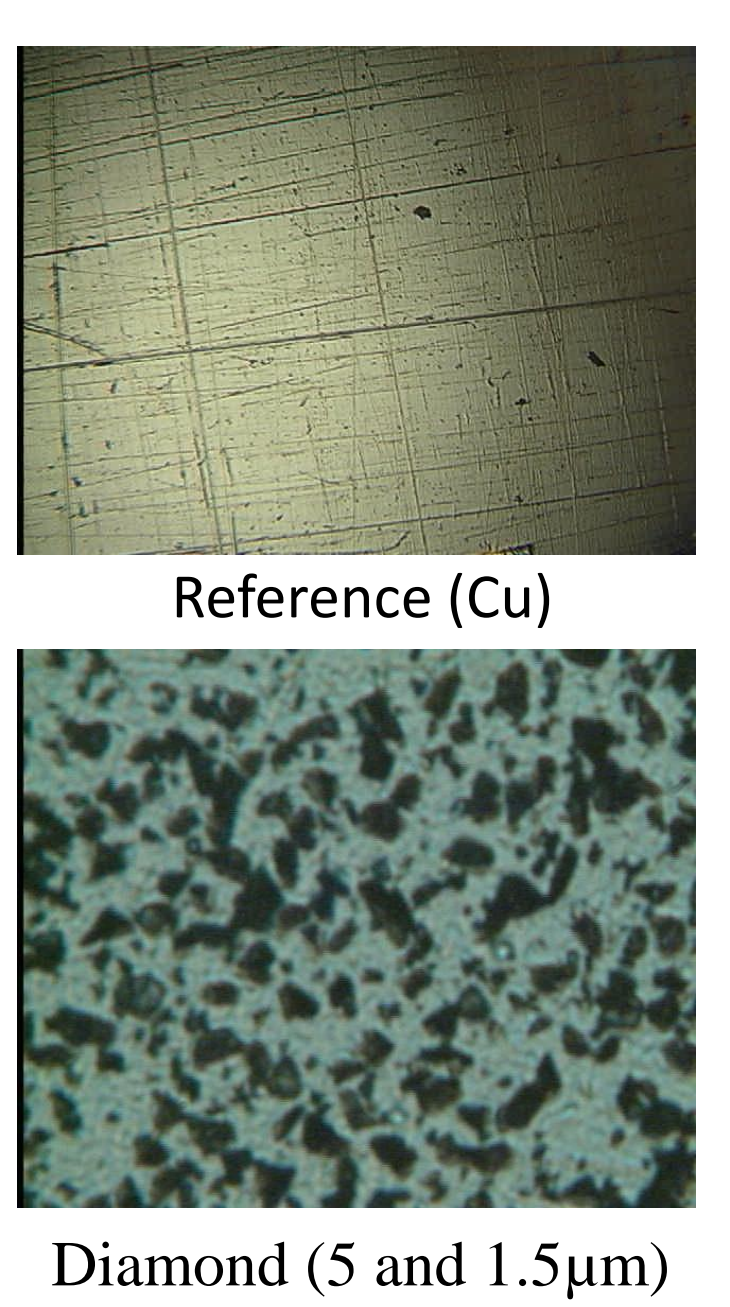
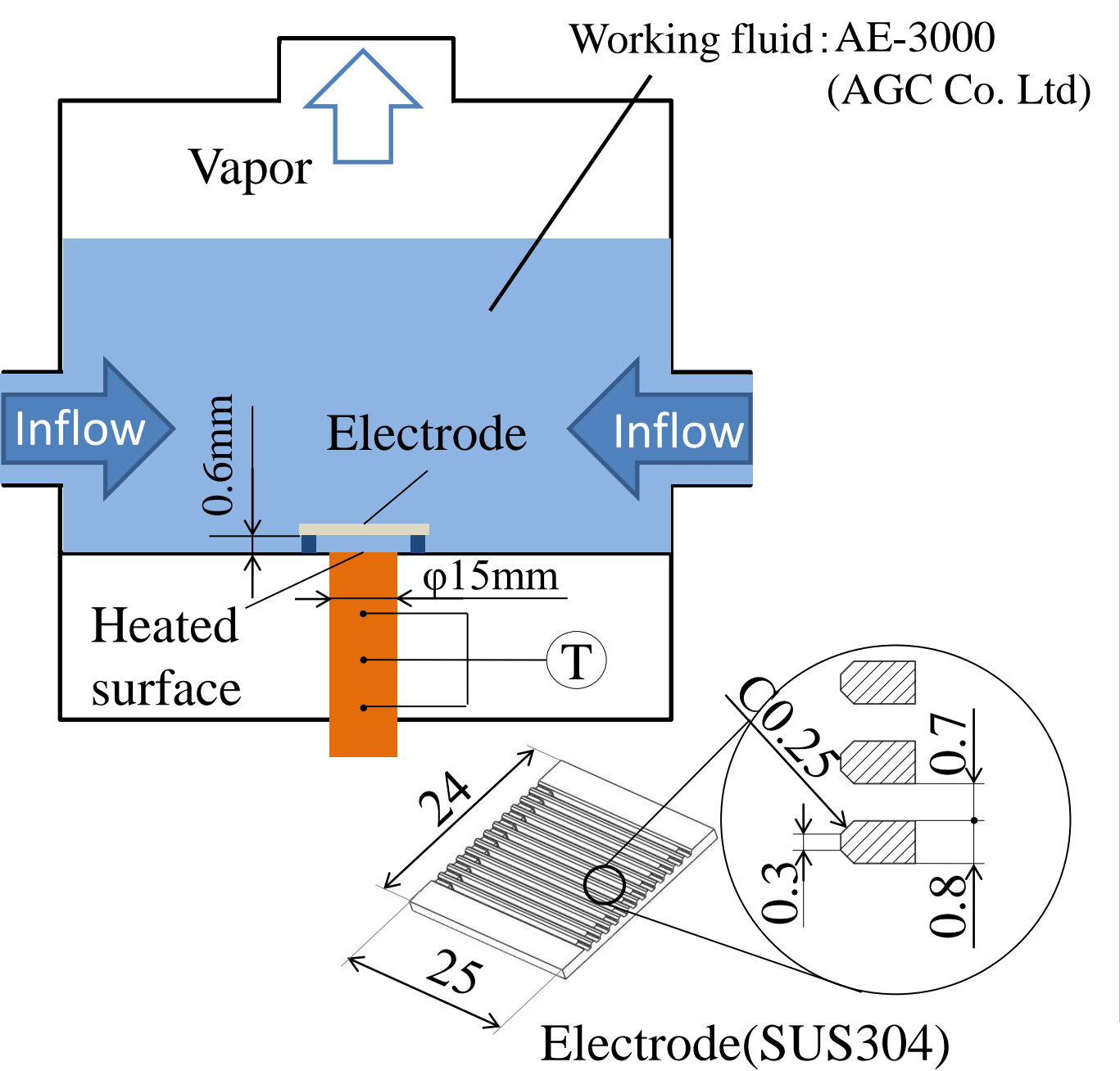
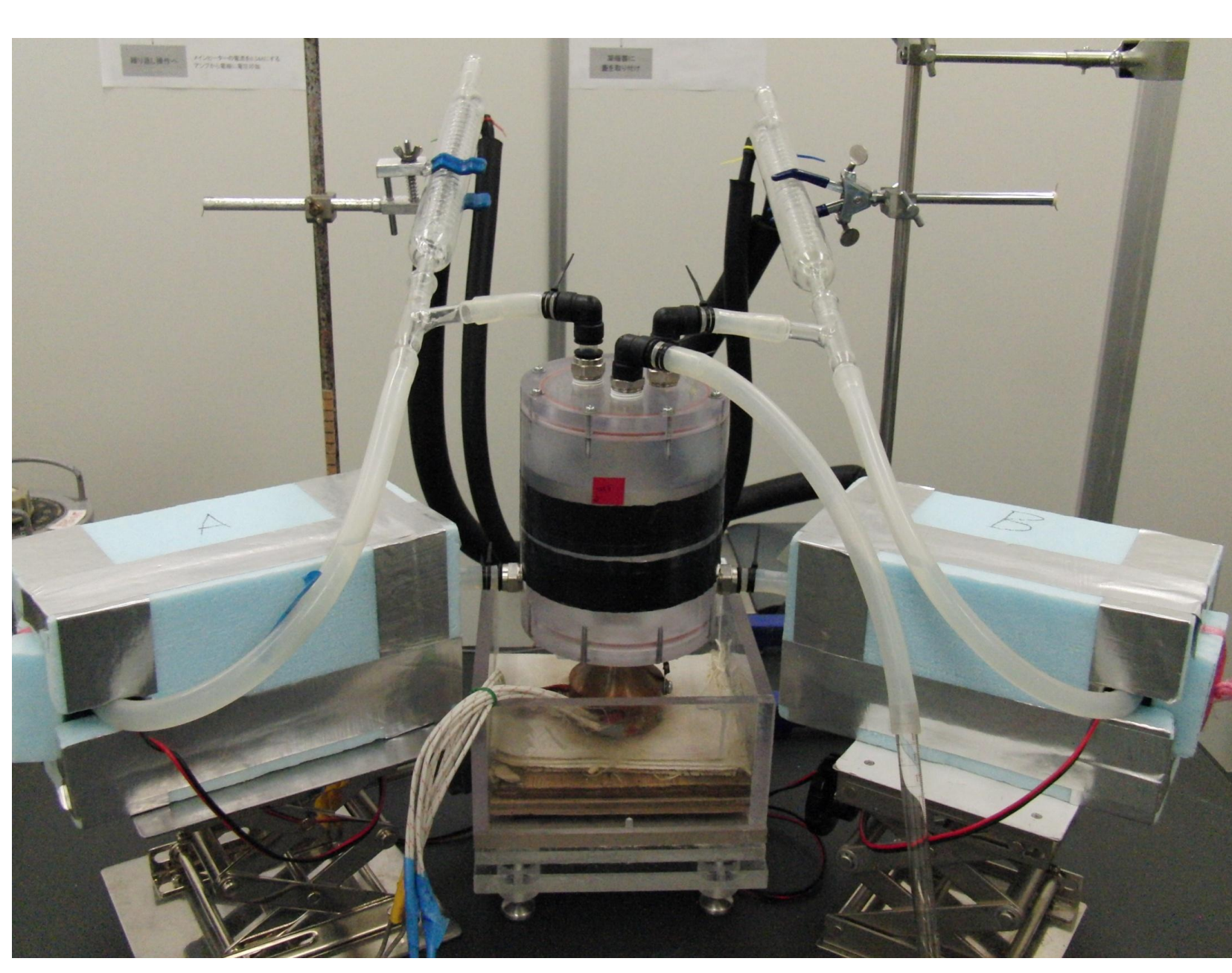
$$q_{Normalized} = \frac{q_{Luttich}}{q_{Zuber} \text{ or } q_{Kano}} = \left(C_A \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} + C_B \frac{1}{\sin \phi} \right) \dots (5)$$

$C_A = -0.00766, C_B = 0.283$

- A_i : 蒸気柱体積に対する界面の面密度
- A_v : 単一蒸気中に対する伝熱面の面密度
- z : 伝熱面から蒸気柱中心までの高さ
- \vec{n}_i : 界面に垂直な単位ベクトル
- S_i : 界面
- dS : 界面の関数行列
- R_0 : 伝熱面半径
- \vec{x} : 位置ベクトル
- ϕ : 方位角
- ϕ : 接触角

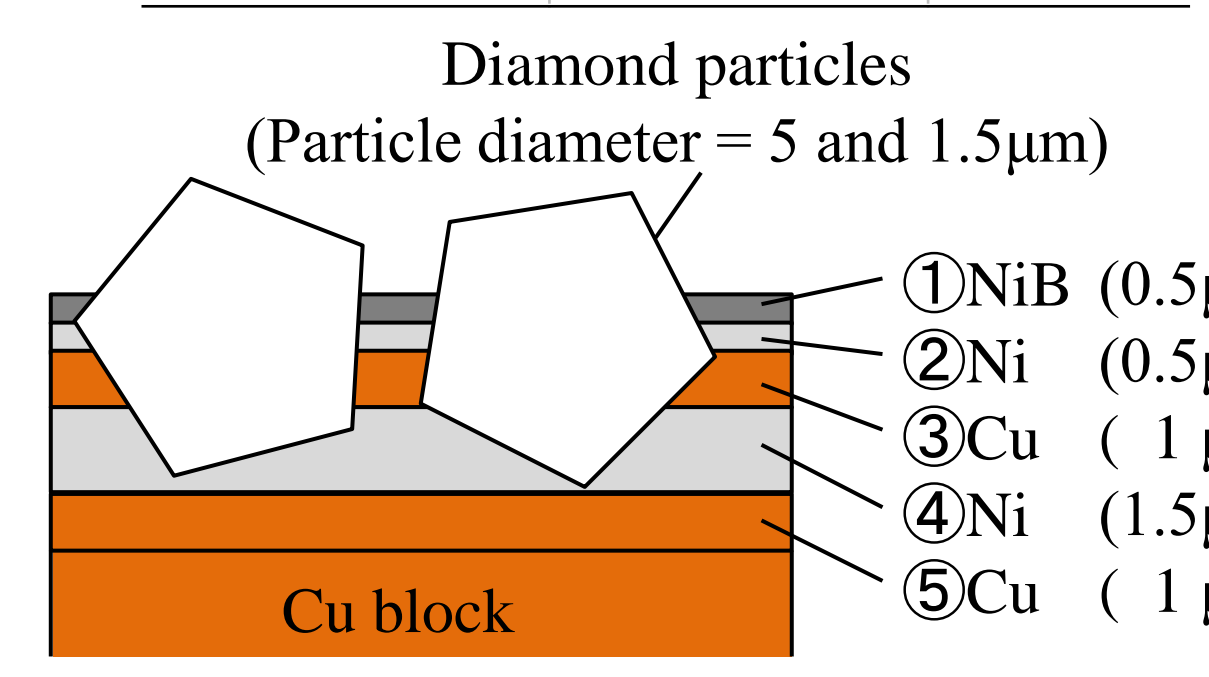
実験装置

実験装置図



伝熱面性状

Heating surface	Contact angle [deg.]	Ra [μm]
Diamond (5 and 1.5μm)	11.0	0.26
Sn	12.1	0.08
Cr	12.4	0.13
NiB	12.8	0.10
Cu	14.5	0.05

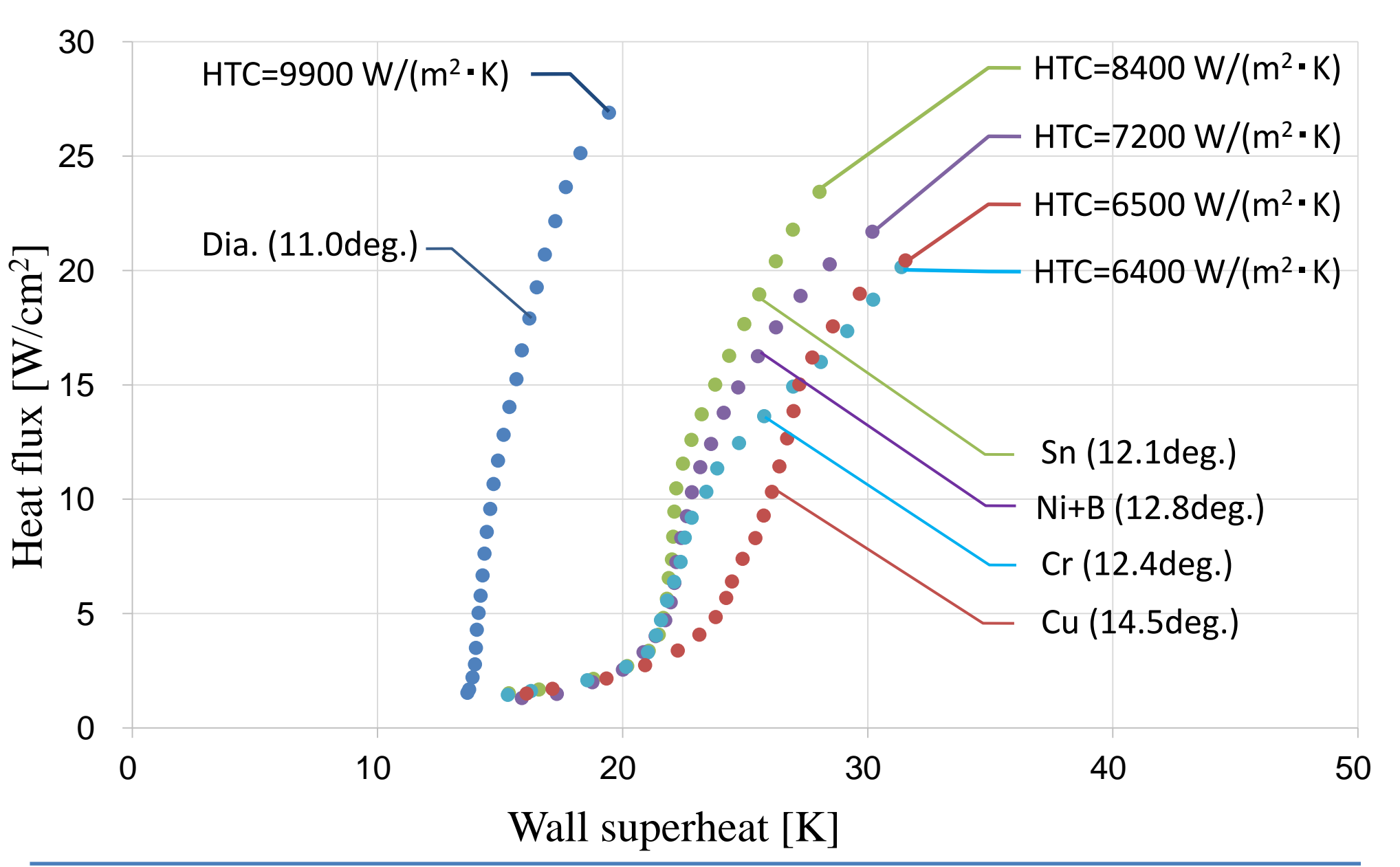


各値の導出式

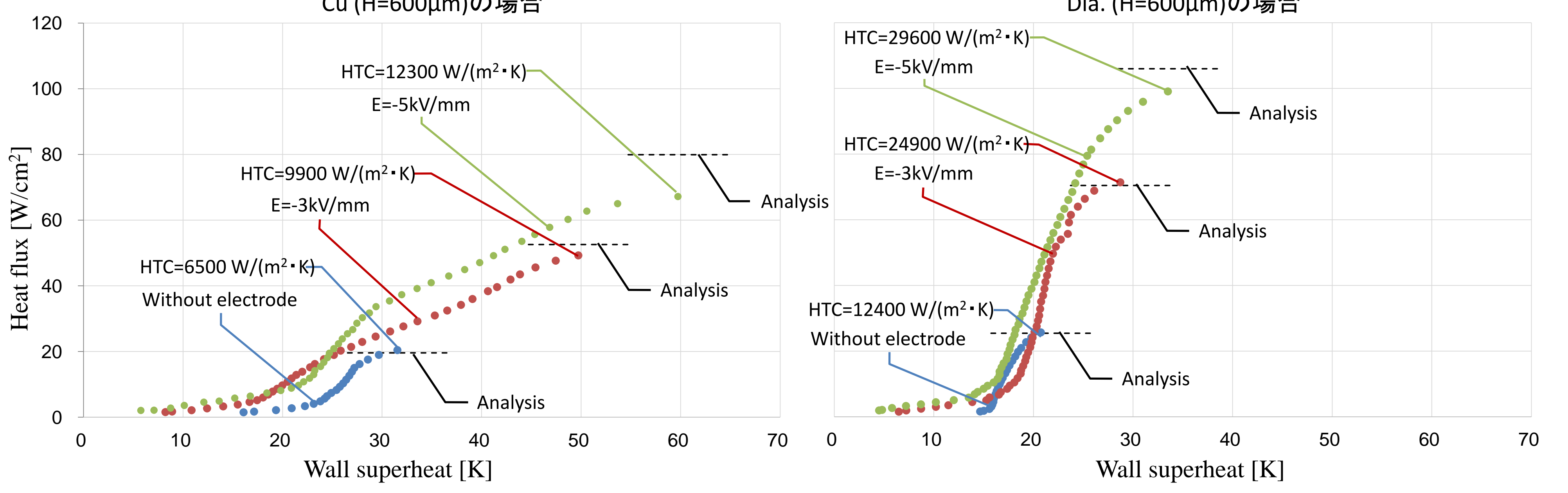
- 熱流束 (フーリエの式)
 $q = -\lambda \frac{dT}{dX}$
 λ : 熱伝導率
 T : 温度
 X : 位置
- 過熱度
 $\Delta T_{sat} = T_{wall} - T_{sat}$
 T_{sat} : 飽和温度
 T_{wall} : 伝熱面温度
- 電界
電界 = 投入電圧 / 電極高さ
投入電圧: 0~3000V

実験結果

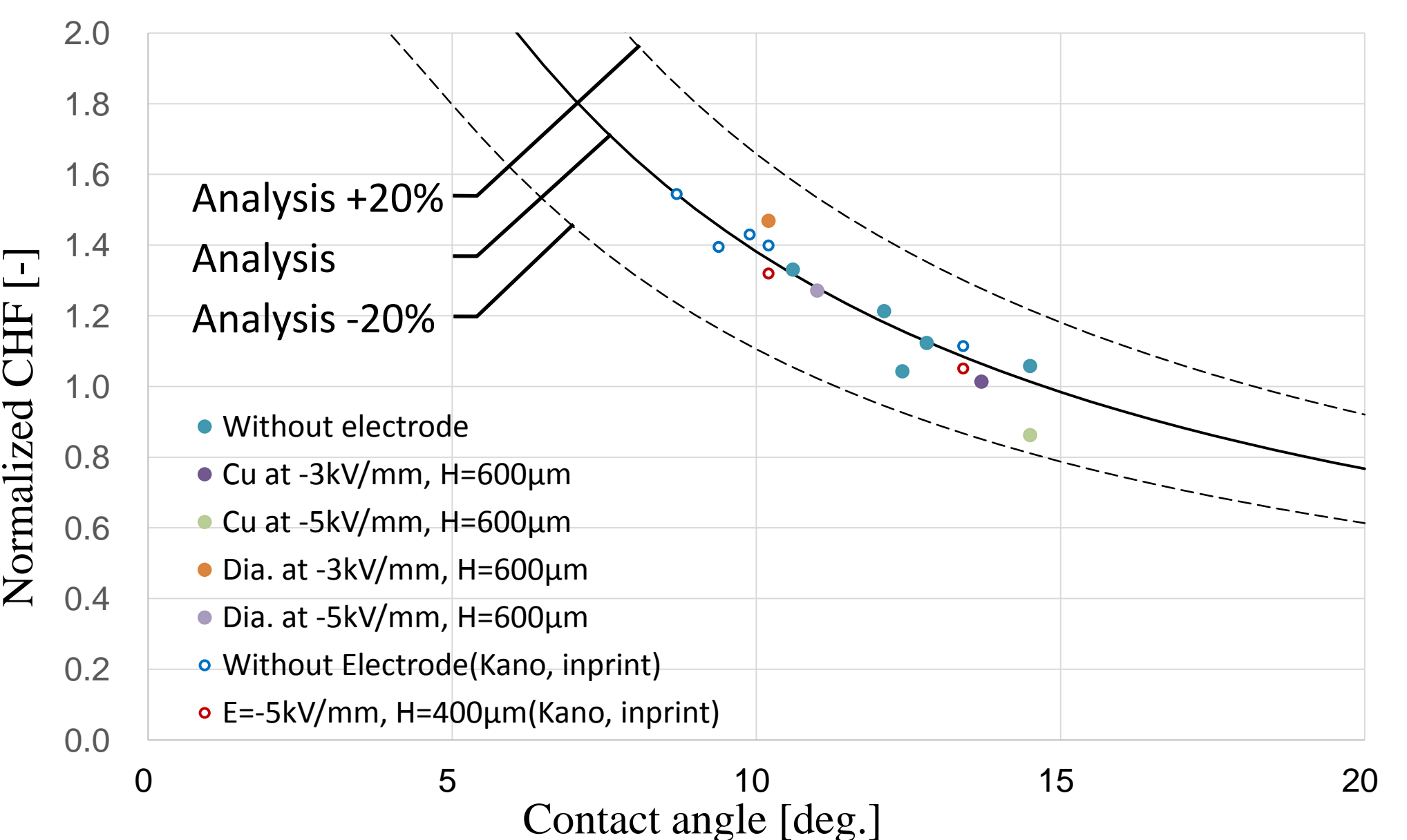
接触角が熱流束に与える影響



静電圧力が熱流束に与える影響



沸騰促進モデルの検証



結言

沸騰促進モデルの検証

- 接触角が熱流束に与える影響
接触角の減少 → CHFが上昇 過熱度が減少 → 熱伝達率上昇 12000 W/(m²·K)
- 静電圧力が熱流束に与える影響
電界の増加 → CHF上昇(99 W/cm²) 過熱度上昇 → 熱伝達率上昇 30000 W/(m²·K)

沸騰促進モデルを6つのパラメータで考慮 (接触角, 静電圧力, 電極高さ, 表面張力, スリット長, スリット幅)

理論式でCHFを±20%の精度で予測