

液体微小流量校正のための 小型デバイスの開発

加賀見 俊介

産総研 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 液体流量標準研究グループ 研究員

2025年11月7日

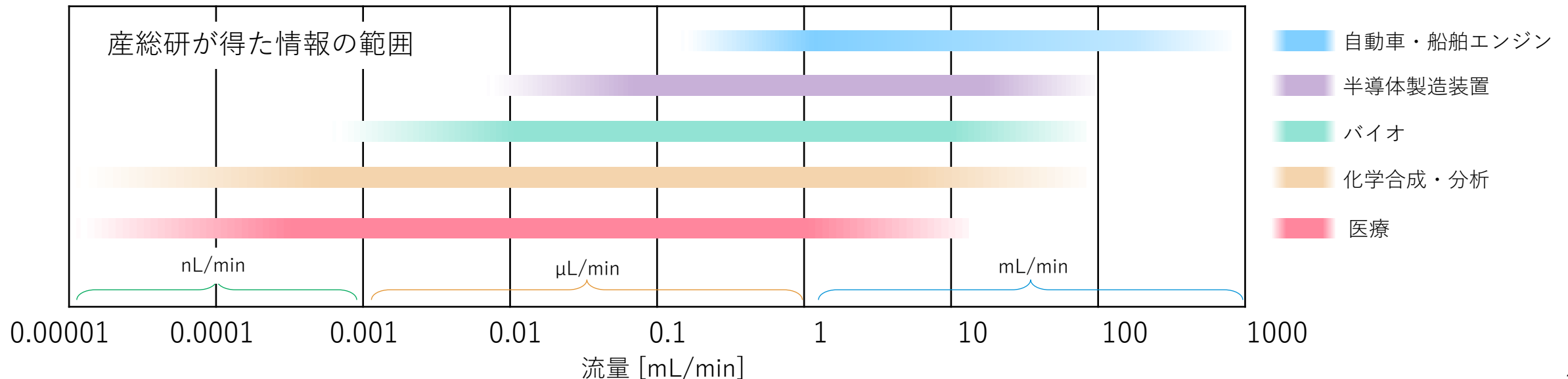
NMIJ流量計測クラブ

1. 液体微小流量の概要とニーズ
2. 研究背景
3. 小型デバイス開発
4. まとめ

- 微小な流量を用いるマイクロフレイディクスデバイスは、自動車・船舶エンジン、半導体製造装置、バイオ、化学、医学などの分野を中心に利用が拡大している

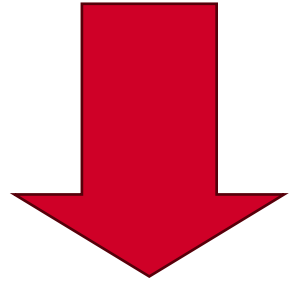
[微小流量デバイスのメリット]

- デバイスの小型化
- サンプル使用量の削減
- サンプル体積の減少による熱容量の低下 ⇒ 加熱の高速化
- 攪拌の高速化
- 表面張力による流体の駆動（機械部品不要）

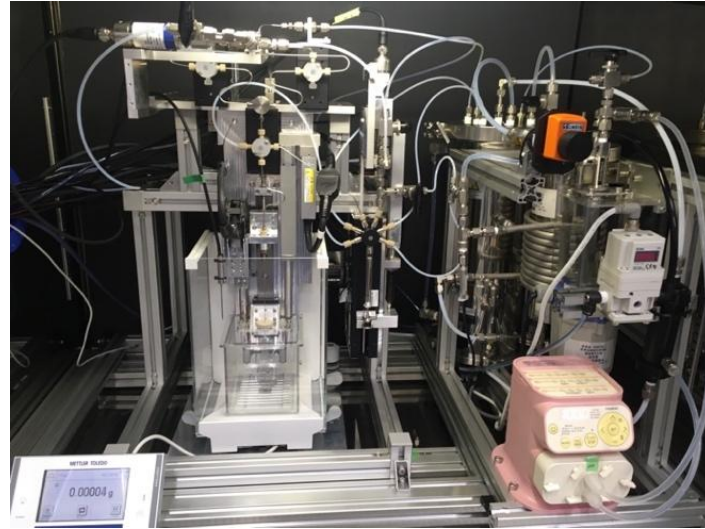


1. 液体微小流量の概要とニーズ
- 2. 研究背景**
3. 小型デバイス開発
4. まとめ

微小流量標準



エンドユーザー



産総研で開発した
通液式静的秤量法による
微小流量校正装置

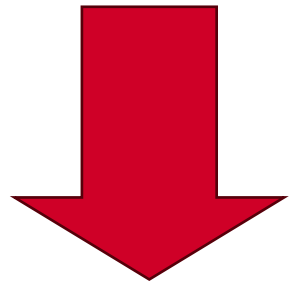
(Doihara et al., *Flow Meas. Instrum.*, 2021)

- 国外でも、2010年代以降に欧州の標準研究所を中心としたプロジェクトが複数発足されたこともあり、校正装置の開発が広く行われている
- 標準装置で使われる校正手法：
静的秤量法、動的秤量法、Front-tracking、PIVなど

(加賀見、液体微小流量の計測手法と標準に関する調査研究、産総研計量標準報告、2025)

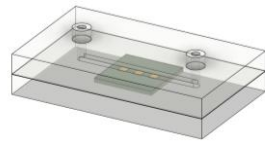
課題：校正装置は大型・高コストであり汎用性には欠ける
⇒エンドユーザーに標準値を供給するためのデバイスが必要

微小流量標準



エンドユーザー

本研究の目的：
エンドユーザと標準を繋ぐ『**オンサイト校正チップ**』の開発

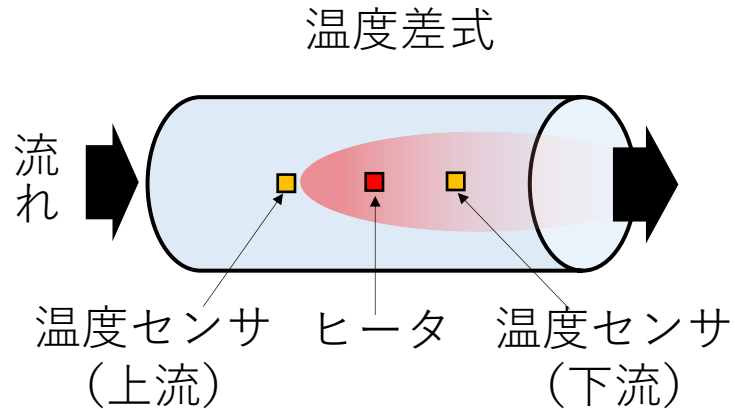


開発イメージ図

[開発のポイント]

- 校正デバイスとして十分な高い精度
 - 流量を絞って高精度化
 - 流量ごとに専用のものにする（分銅のような使い方を想定）
- 安価かつ簡便に使用可能
 - MEMS微細加工技術による同時大量生産によりコストダウン
- 多様な液種に対応できる（※）
 - 生体液、有機溶剤、化学試薬などを想定
 - 実験や数値流体解析により物性の影響を評価

熱式計測法 ⇒ MEMS加工技術と好相性（流路・センサの微細化、デバイスの小型化）



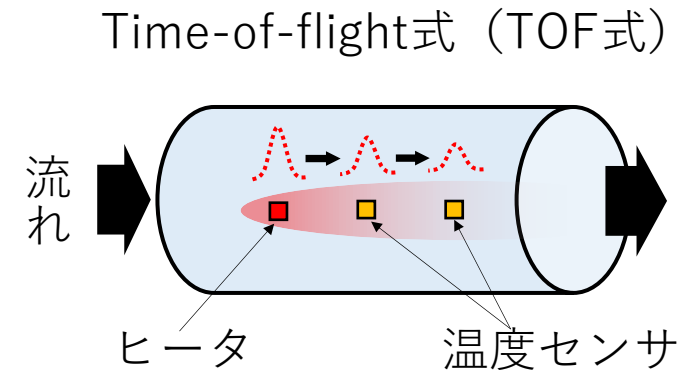
- ・ 上下のセンサーの温度差から流量を求める

長所

- ・ 極小流量を計測可 (10 nL/min～)

短所

- ・ 物性への依存性が大きい
- ・ 流量レンジが小さい (1:10程度)



- ・ ヒータからセンサーに熱が伝わるまでの伝播時間差から流量を求める

長所

- ・ 物性への依存性が小さい

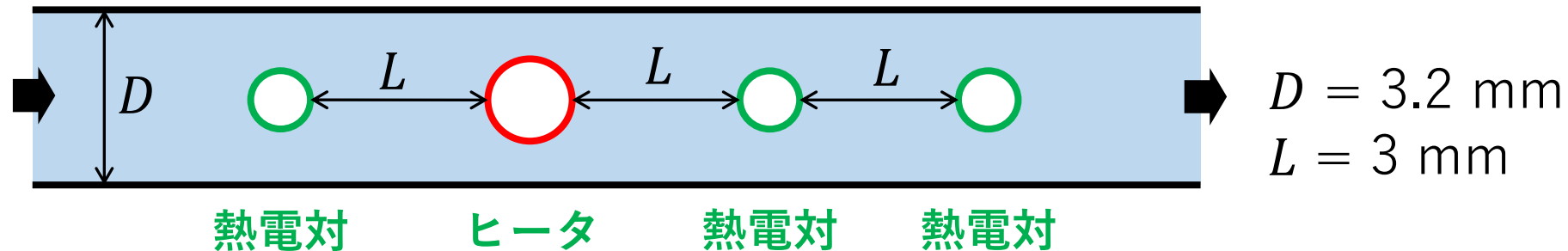
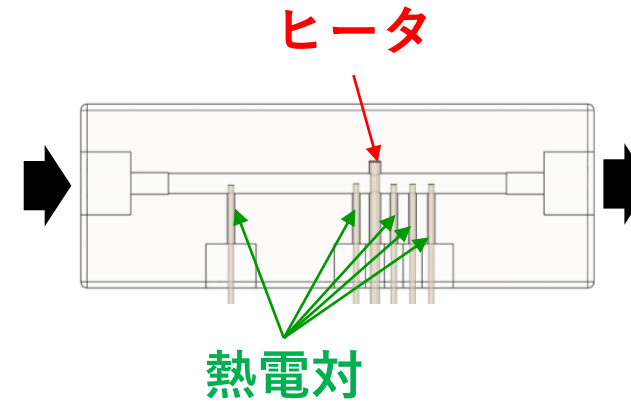
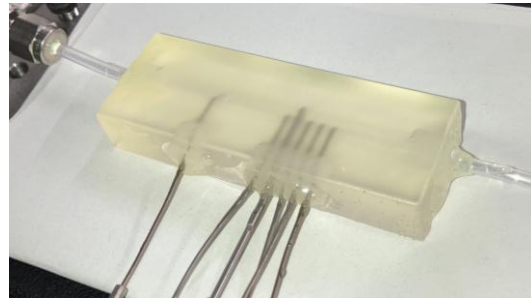
短所

- ・ 10 μ L/min 以下の計測は難しい
- ・ 流量レンジが小さい (1:10程度)

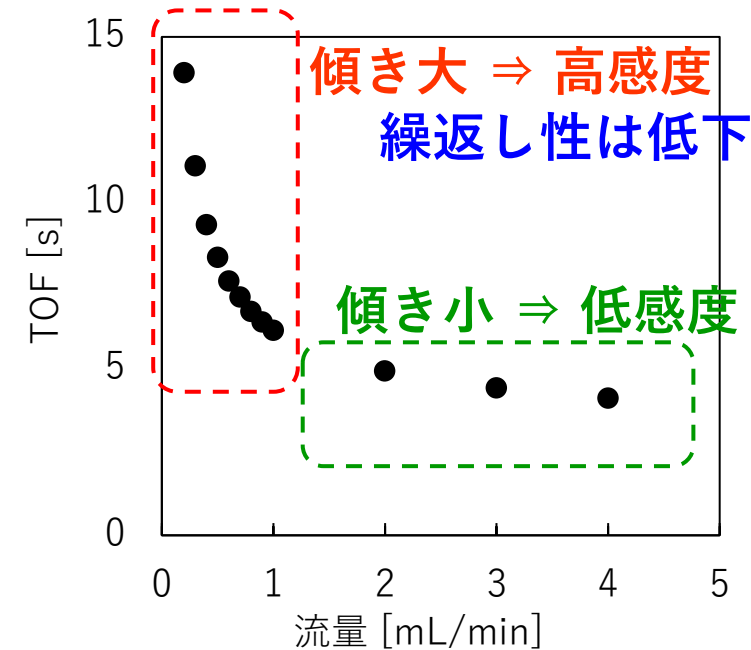
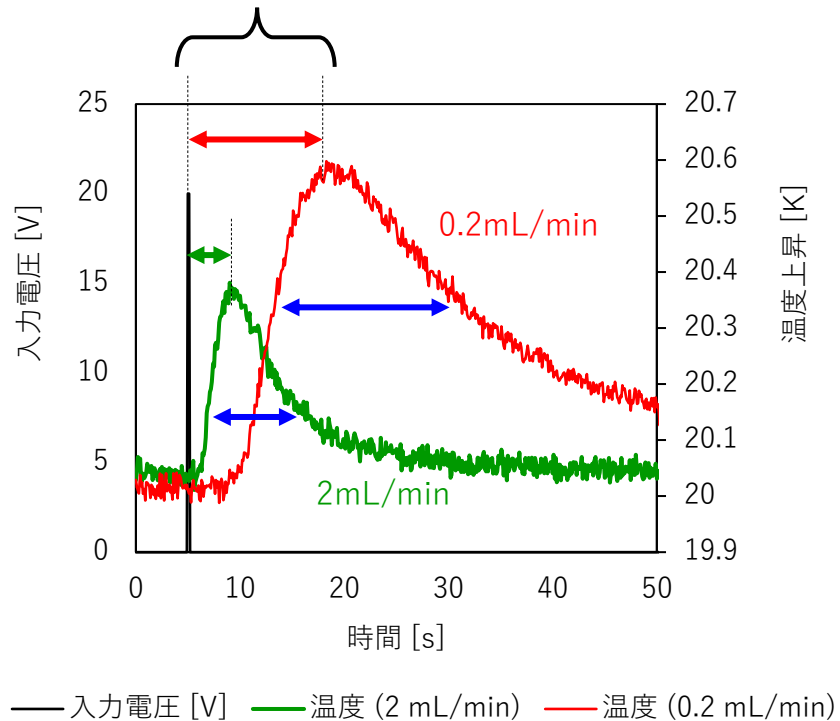
- ・ 物性への依存性の極小化にむけ、主にTOF式に着目した研究を実施
- ・ TOF式の流量レンジは小さいが、目標流量点を絞るならば大きな問題にはならない？

1. 液体微小流量の概要とニーズ
2. 研究背景
- 3. 小型デバイス開発**
4. まとめ

- MEMS加工の前段階として、試作流量計を作成して特性の解析を実施
- 筐体は3Dプリンタで印刷し作成
- ステンレスシース型のヒータ・熱電対を取り付け、接着剤を固化させて封止する



時間差 (TOF) を計算（相関関数法）



- 流量が下がるにつれて感度は上がるが、信号の広がりやピーク値の減少によりSN比が低下するため繰返し性は低下する（感度と繰返し性がトレードオフ関係）
⇒ 目標流量で不確かさが最小になるような流路経、熱電対・ヒータ配置の最適化が必要

- 温度伝播の可視化や熱物性の影響の検討のために、簡易モデルを用いたシミュレーションを実施
- 使用した簡易モデルの導出過程：

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot (\nabla T) \right] = \nabla \cdot (k \nabla T) - (\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{u}) + T \beta \frac{Dp}{Dt} + q. \quad (\text{エネルギー保存式})$$

(c_p : 定圧比熱 k : 熱伝導率 $\boldsymbol{\tau}$: 粘性応力テンソル β : 体膨張係数)

簡
略
化

[仮定]

- 非圧縮流れ
- 軸対称の円筒座標系 (x, r 方向を考慮)
- 速度場は既知 (ハーゲン・ポアズイユ流れ) とする $\Rightarrow$ 未知変数は温度のみ
- 物性値は定数とする • 体積膨張は無視

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \underbrace{2\rho c_p \bar{u} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \frac{\partial T}{\partial x}}_{\text{対流}} = \underbrace{k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{\text{熱伝導}} + \underbrace{k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{32\mu \bar{u}^2}{r_0^4} r^2}_{\text{粘性}} + q.$$

対流
(流量・流速)

熱伝導

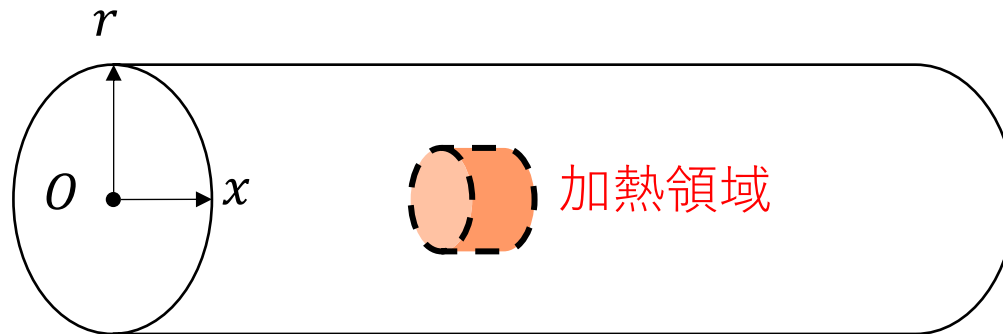
粘性

(μ : 粘性係数)

シミュレーションの問題設定、解法など

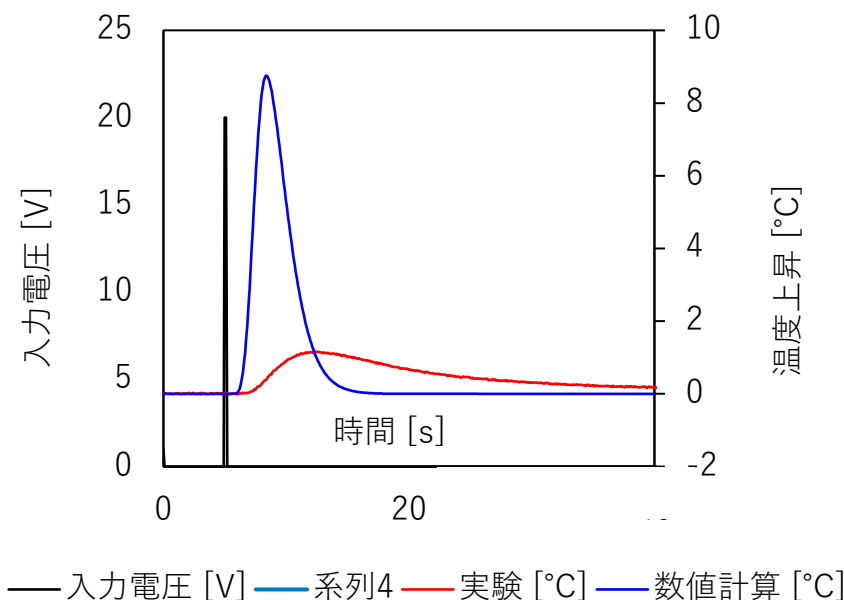
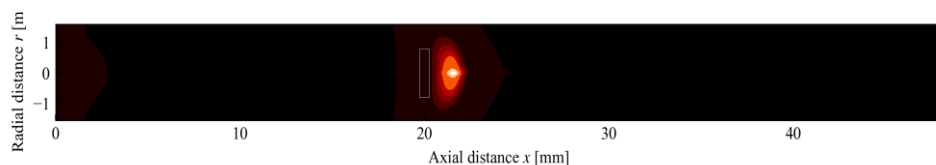
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + 2\rho c_p \bar{u} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right) \frac{\partial T}{\partial x} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{32\mu \bar{u}^2}{r_0^4} r^2 + q.$$

- ・ 流体領域のみ考慮し、固体領域（ヒータ・熱電対）は省略。
- ・ ヒータによる加熱は、内部発熱 q として流体に直接与える。



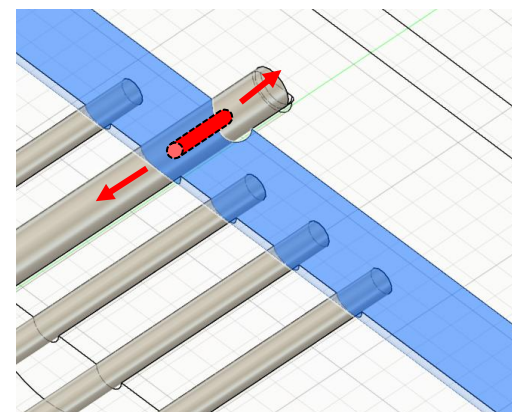
- ・ 時間積分 : 陽的解法 (4次のRunge-Kutta法)
- ・ 対流項 : TVD法 (minmodリミッター)

実験とシミュレーションの比較



[結果] 数値計算の方がピーク温度の上昇値が約10倍大きく、ピーク位置もずれている

[原因] (1) 固体（ヒータ・熱電対）の熱容量
(2) 固体から流体への熱移動
(3) 流路外への熱の逃げ



ヒータ・熱電対等の素子形状の導入が必要（固体・流体連成解析）

物性の影響の予備的検討

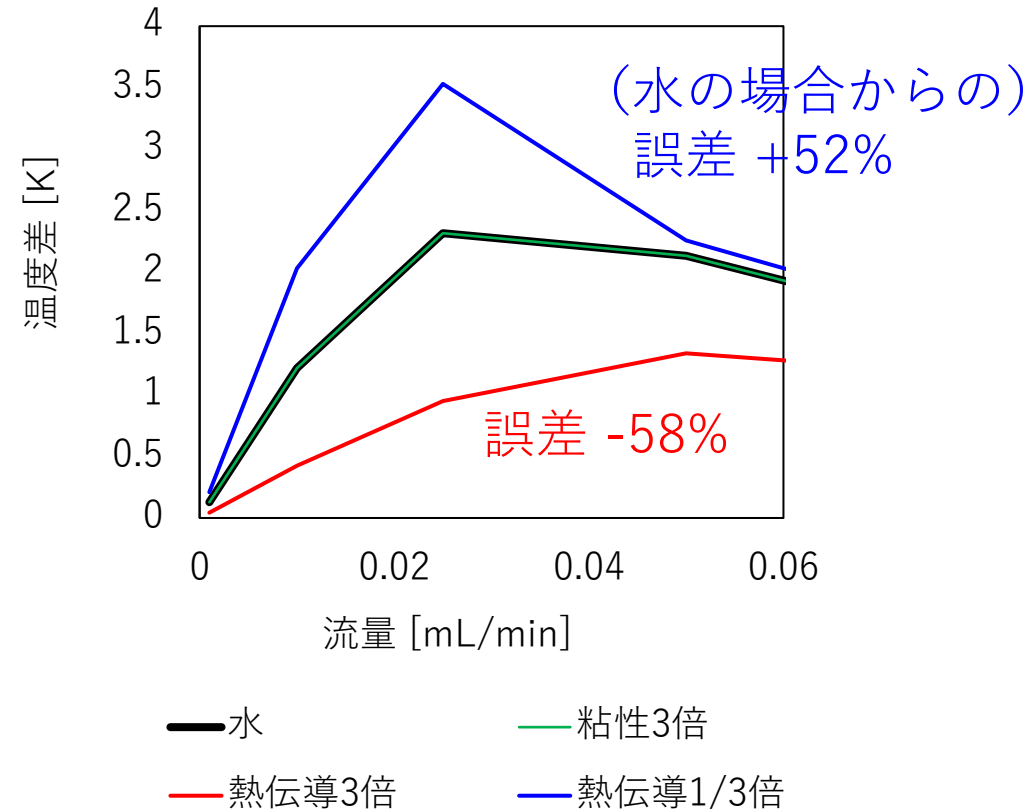
- 簡易モデルを用いたシミュレーションにおいて、熱伝導率 k ・ 粘性係数 μ を水の場合から仮想的に増減させ、影響を調べる

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + 2\rho c_p \bar{u} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right) \frac{\partial T}{\partial x} = \boxed{k} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \boxed{k} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{32\boxed{\mu} \bar{u}^2}{r_0^4} r^2 + q.$$

参考：20°C付近での各液体の物性値

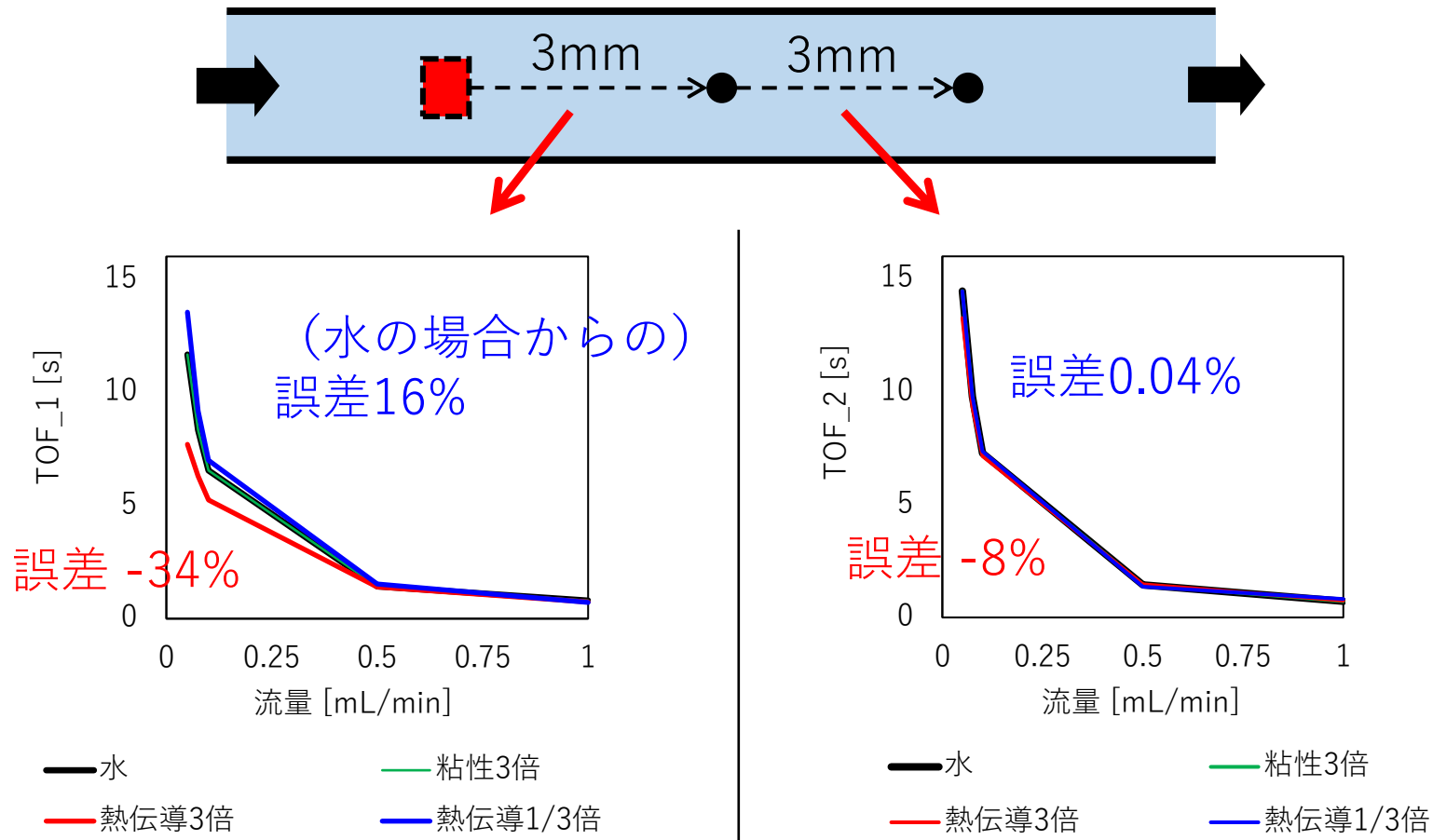
	熱伝導率 [W/(m·K)]	粘性係数 [m Pa·s]
水	約0.60	約1.0
エタノール	約0.17	約1.1
アセトン	約0.17	約0.3
イソプロピルアルコール	約0.13	約2.0

物性の影響の予備的検討 – 温度差式



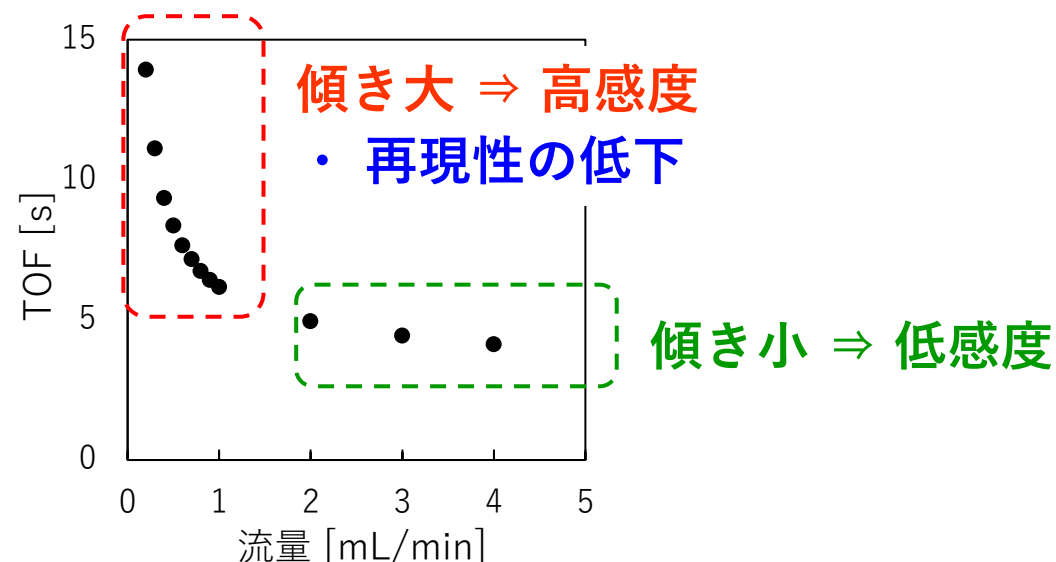
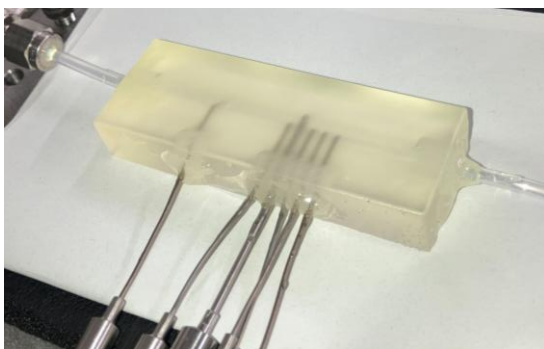
- 粘性の影響はほぼ見られない
- 熱伝導率の変化により大きな誤差が生じる

物性の影響の予備的検討 – TOF式



- 熱伝導
- ・ 熱源遠方の2点（右）を使うことで、誤差を抑えられる
 - ・ 3倍の場合の方が1/3倍より影響が大きい

- 標準とエンドユーザーを繋げる『オンサイト校正チップ』の開発に着手
- デバイスの小型化・低コスト化・熱物性による依存性の極小化に向け、熱式TOF計測法に着目
- 試作流量計を用いた実験を行い、TOF式の基本的な特性を取得



- 簡易モデルを用いた特性の解析を実施
 - 実験とシミュレーションの整合のために流体・固体連成解析が必要
- 物性による影響の検討：
 - 温度差式と比較し、TOF式では物性の影響を抑えられる見込みを得た