

流下ガラス挙動に関する模擬粘性流体による試験について

1. 目的

流下ガラスの不安定（偏流）現象を確認するため、粘性の異なる模擬粘性流体の流下を行い、ガラス流下状態を観察調査することにより、偏流への粘度等関係因子の影響について調査した。

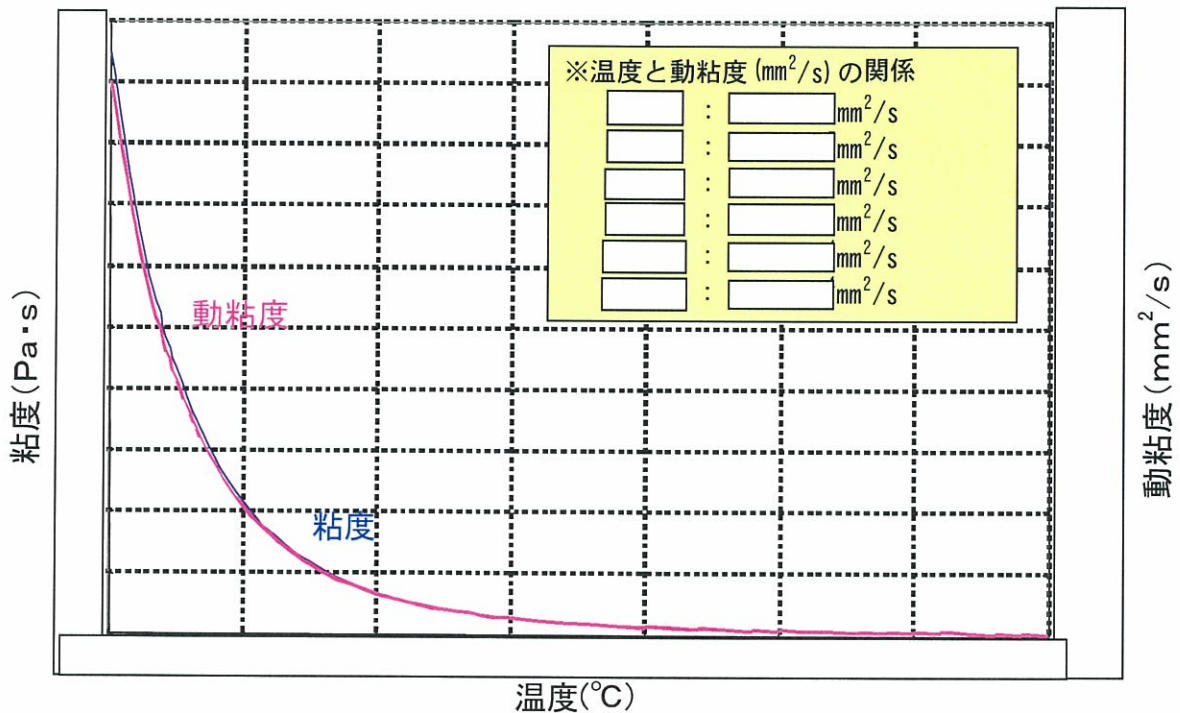
2. 試験方法

(1) 模擬粘性流体の調製

所定粘度のシリコンオイルに油溶性染料(0.02wt%)を添加し、試薬調製を行った。

- ①標準流下ガラス模擬流体 A：動粘度 37,000mm²/s (at25°C)、赤色
- ②高粘性流下ガラス模擬流体 B1：動粘度 300,000 mm²/s (at25°C)、青色
- ③高粘性流下ガラス模擬流体 B2：動粘度 500,000 mm²/s (at25°C)、緑色

標準ガラスの温度と粘度(Pa・s)、動粘度(mm²/s)の関係を図－1 に示す。



図－1 ガラスの粘度・動粘度の変化

(2) 試験装置

図-2 に示すようにノズル部上部より試薬供給し、観察を行った。

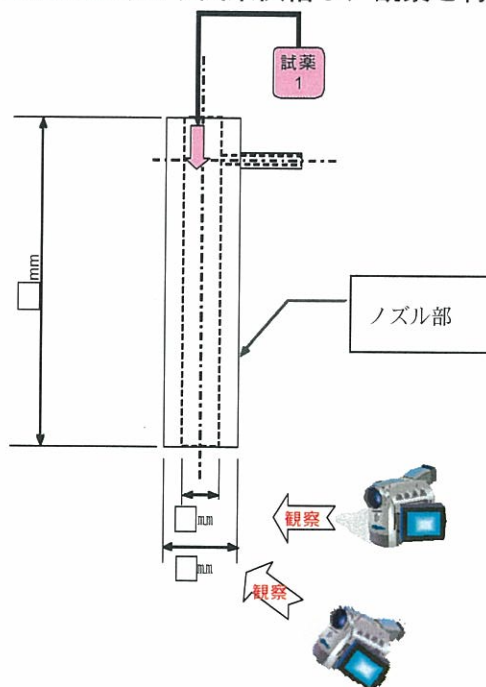


図-2 試験装置

3. 試験結果

模擬粘性流体のノズル先端からの観察状況を図-3、表-1 に示す。

- ①A、B1 及び B2 の全ての試料において、ノズル先端エッジ部でティーポット現象によるノズル外側に向かう回り込みが見られた。
- ②A、B1、B2 と粘度が大きくなるに従い先端部の回り込みの程度が大きくなった。試料 B2 では、最大約 10mm 程度の回り込みが観察された。
- ③全ての試料において、先端部のエッジで回り込みが生じるが重力による垂直流下に移ると、エッジ部から外側に若干回り込んだ状態（2～3mm 程度）で安定した流下となる。この時点での回り込みの程度には、試料の間で顕著な差はなかった。

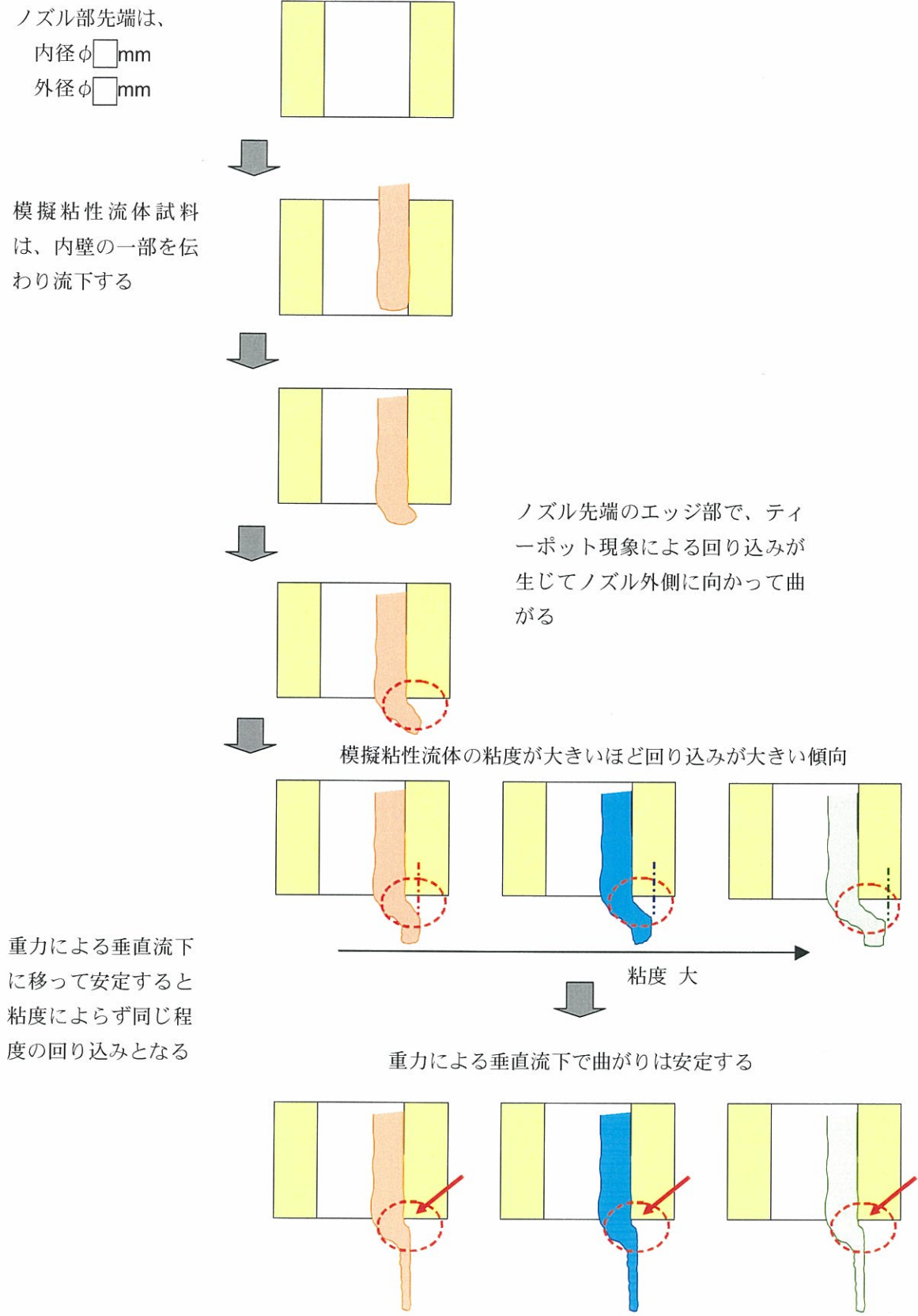
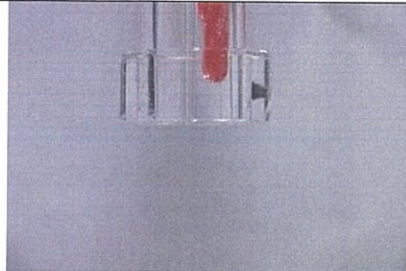
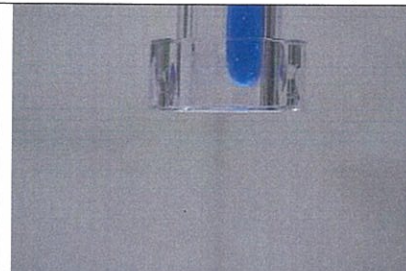
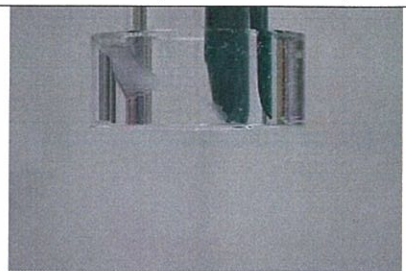
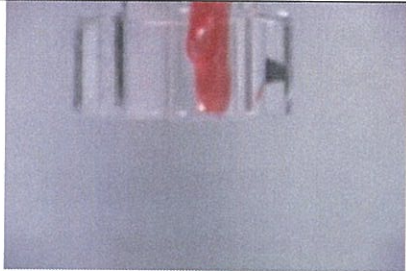
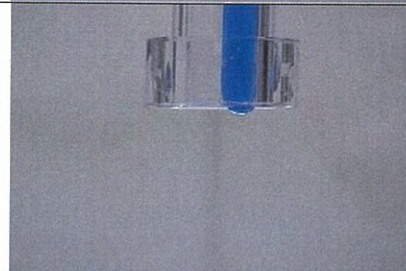
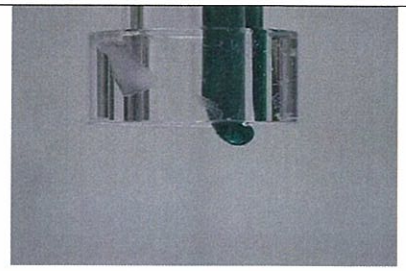
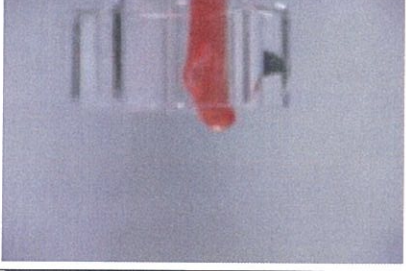


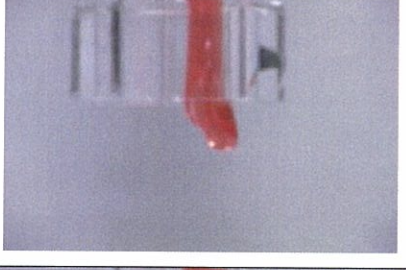
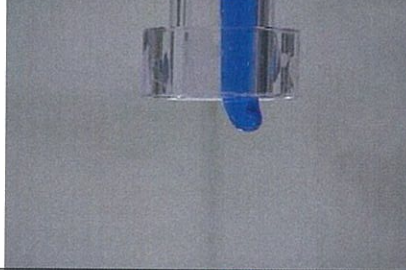

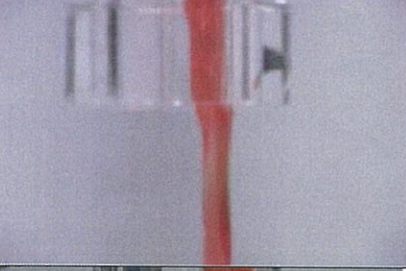
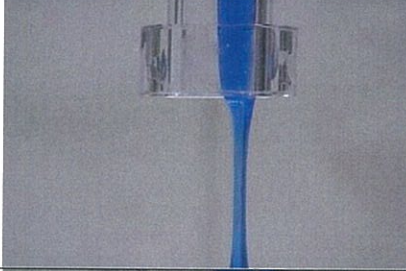
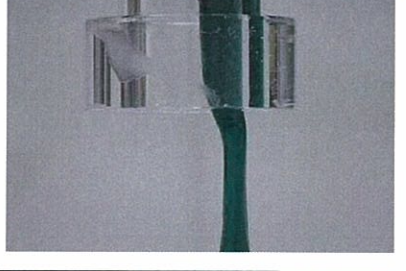
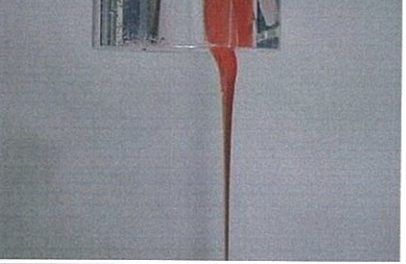


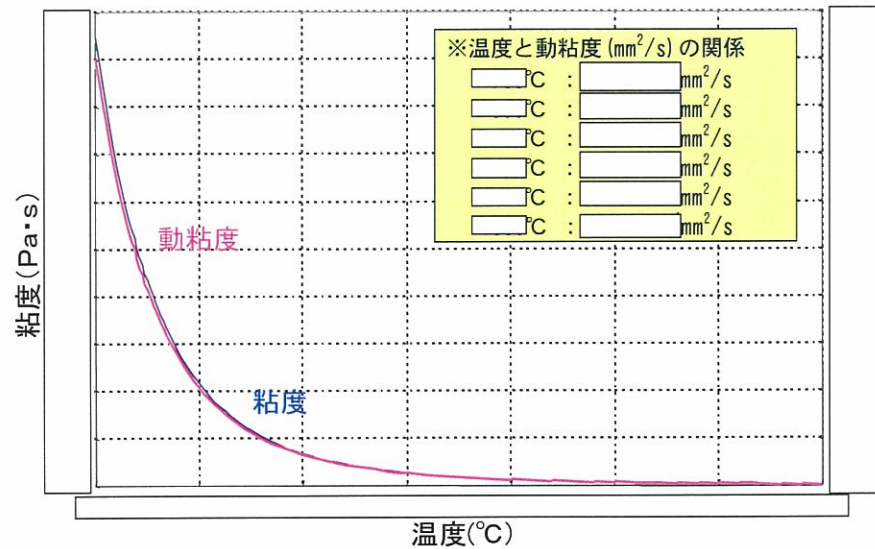


図-3 模擬粘性流体のノズル先端からの観察状況

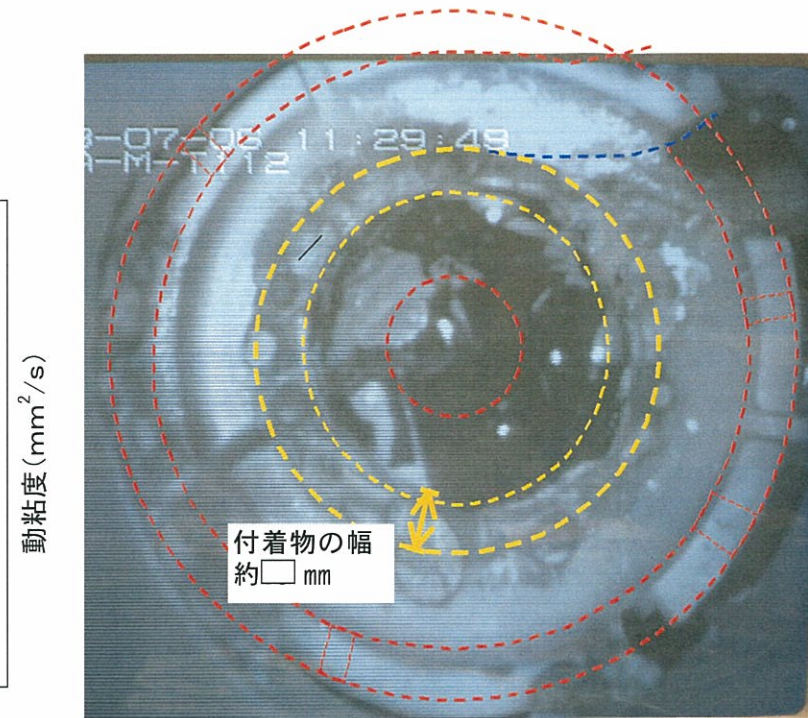
表-1 模擬粘性流体による流下状態の比較 (動粘度によって経過時間は異なる)

	A 試薬($3.7 \times 10^4 \text{mm}^2/\text{s}$)	B1 試薬($3.0 \times 10^5 \text{mm}^2/\text{s}$)	B2 試薬($5.0 \times 10^5 \text{mm}^2/\text{s}$)
1			
2			
3			
4			
5			
安定時			

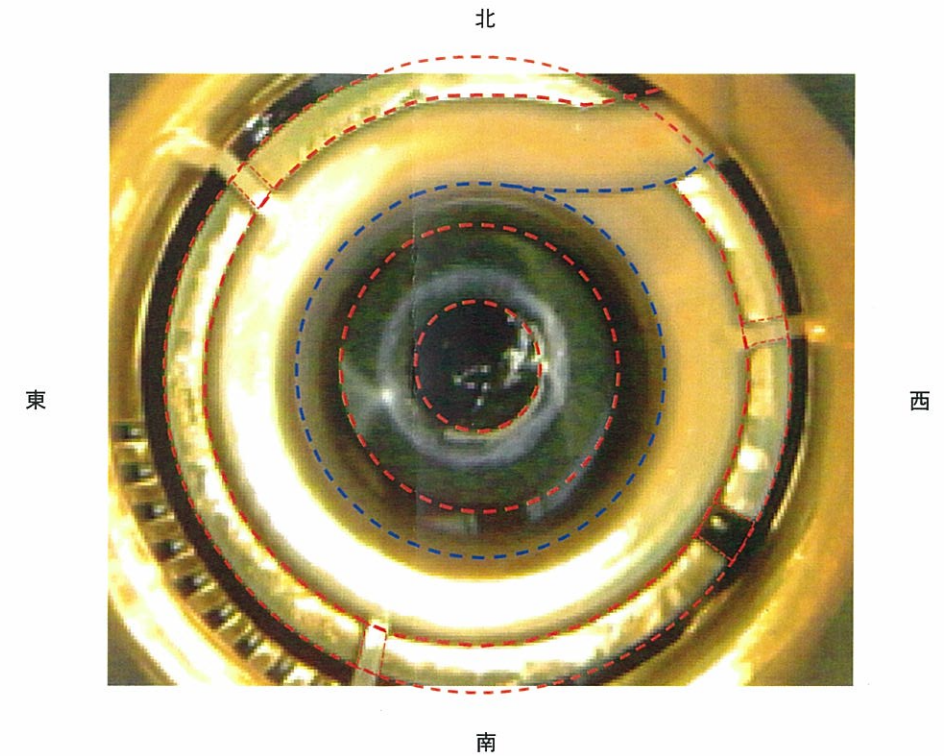
流下ノズル出口における流下ガラスの付着・堆積



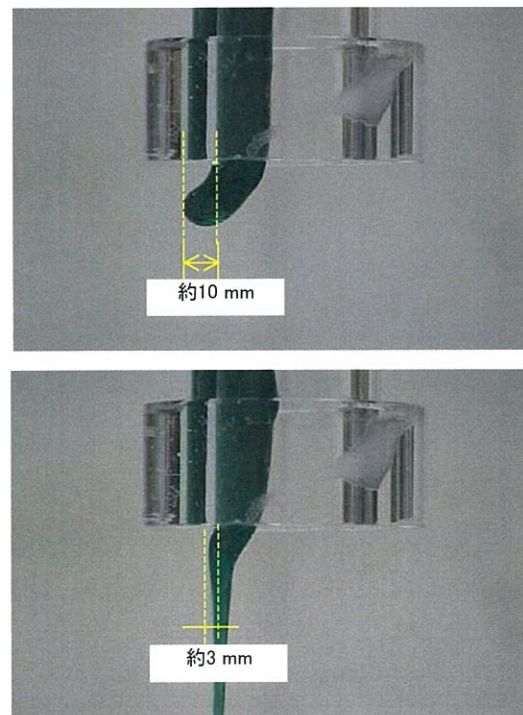
ガラスの温度と粘度、動粘度の関係



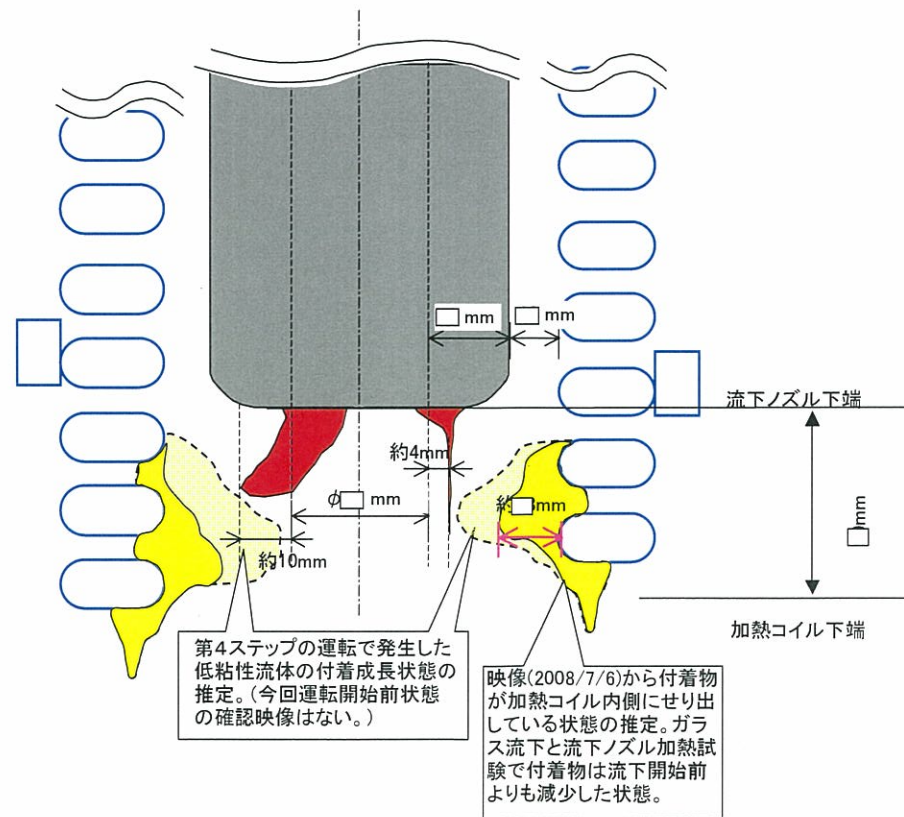
流下ノズルおよび高周波加熱コイル(付着物あり)(2008/7/6撮影)



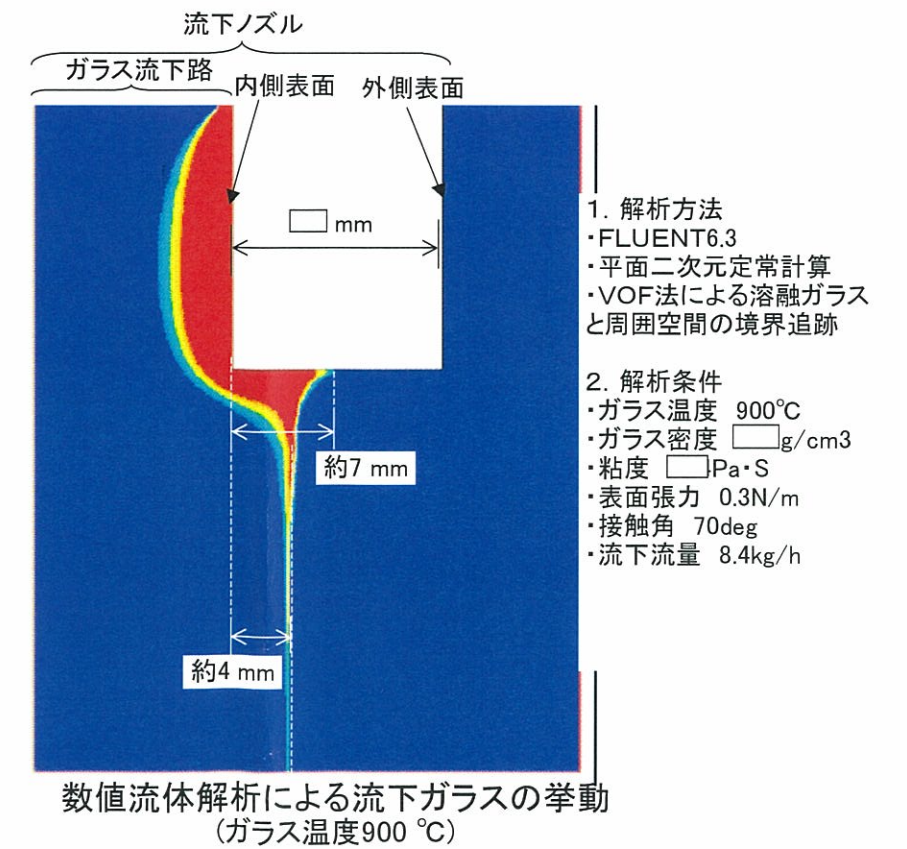
流下ノズルおよび高周波加熱コイル(付着物なし)(化学試験時撮影)



模擬粘性流体による流下開始時の状況
動粘度 50万mm²/s (ガラス温度約□°C相当)



高周波加熱コイル付着物の推定概念図



数値流体解析による流下ガラスの挙動 (ガラス温度900°C)

・流下ガラスの高周波加熱コイル下端付近における閉塞について、結合装置下方からの映像および数値流体解析、模擬粘性流体試験による結果を踏まえて検討した。
 ・第4ステップの運転で低粘性流体が発生し高周波加熱コイルに付着成長したところに、流下ノズル温度が低い状態での流下で、流下ガラスの粘性が高く鉛直に流れ難くなり、高周波加熱コイルに付着した低粘性流体に接触した。接触した部分を起点として流下ノズル出口に向けて徐々に流下ガラスが付着しノズル出口を塞ぐ堆積となった。

流下ノズルと高周波加熱コイル間におけるガラス上昇速度について

1. 概要

アクティブ試験における流下停止事象において、全段加熱の継続により流下ガラスが流下ノズルと高周波加熱コイル間の隙間から上昇して流下ノズル上端まで達したことが要因の一つとして考えられることから、上昇速度及び上昇時間について評価した。

【流下ガラスが上昇し、流下ノズル上端まで達した推定】

- ・全段加熱開始後、流下ガラスが高周波加熱コイルの付着物に接触し、そこを起点として流下ガラスが蓄積し、流下ノズル下端部が閉塞した。
- ・ガラスにはヘッド圧が作用するため、温度の高い流下ノズルの外表面に接触したガラスが徐々に上昇して流下ノズル上端まで達した。
- ・流下ノズルは高周波加熱により高温であるが、高周波加熱コイルは冷却水で冷却されていることから温度が低いため、高周波加熱コイル側では冷却されてガラスが固化し、高周波加熱コイル間の隙間から外側へガラスが漏えいすることはなく、固化したガラスを壁にした状態で流下ノズル側の隙間をガラスが上昇した。

2. ガラスの上昇モデル

ガラスの上昇に関する推定の技術的成立性を検討するため、ガラスが高周波加熱コイル上端まで達する時間のオーダーを把握する目的で概略評価を行った。評価モデルは、熔融炉のガラスのヘッド圧を受けて、流下ノズル外面から一定の幅で一定温度のガラスが上昇するものとして、同心二重管管内充満流の圧力損失を計算する式を使用することとした。

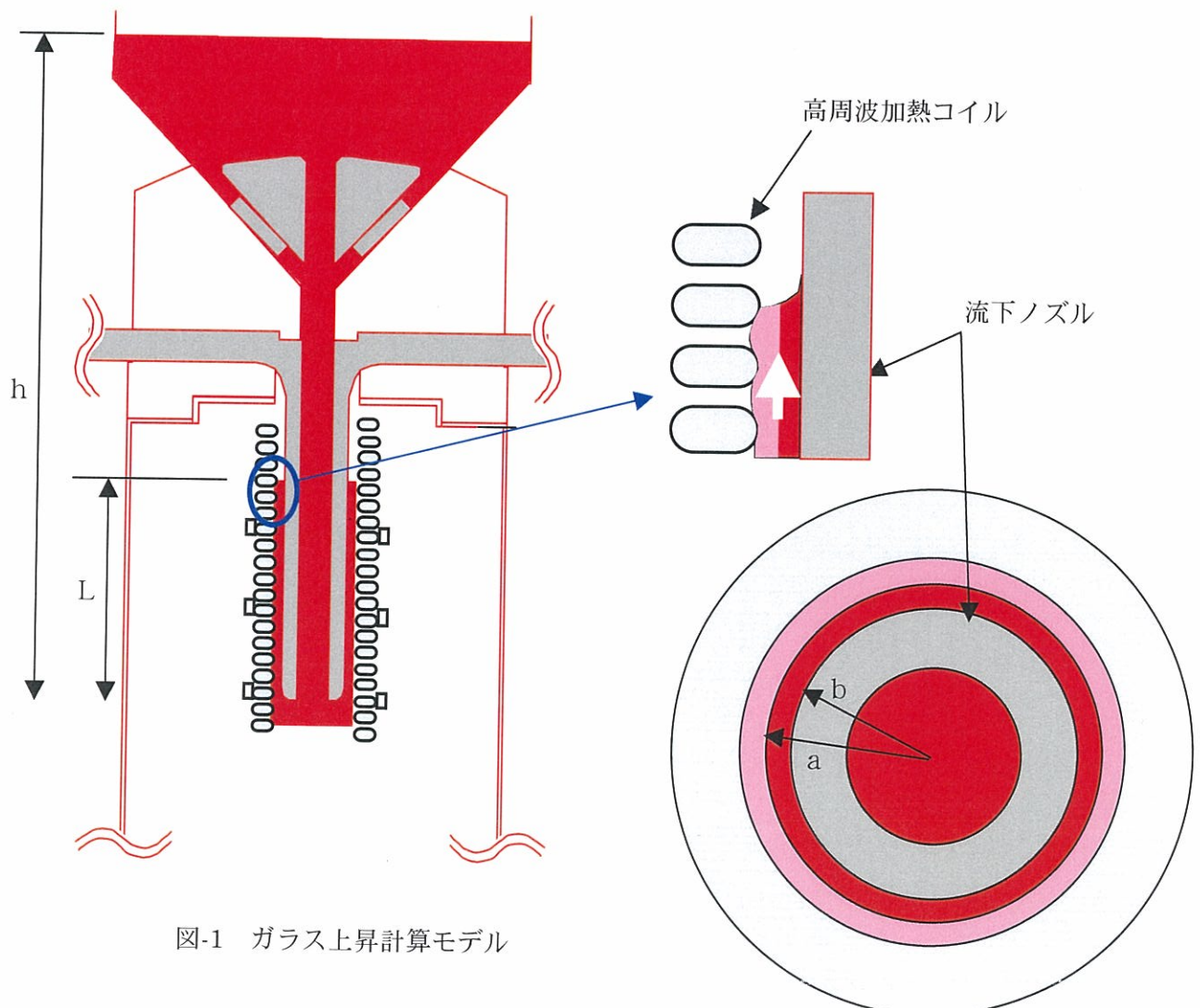


図-1 ガラス上昇計算モデル

3. 上昇速度と上端までの到達時間の計算

流下ノズルと高周波加熱コイル間の付着ガラスは径方向に大きな温度勾配があるので、温度勾配に応じたガラスの粘度で決まる流速分布を持つことになる。ここでは、簡易的な方法として、熔融炉のガラスのヘッド圧を受けて、流下ノズル外表面から一定の幅で一定温度のガラスが上昇するものとして計算する。

計算は、同心二重円管の圧力損失を計算する以下の式※を使用する。また、流体抵抗は流下ノズルと高周波加熱コイル間のみを考慮するものとし、流下ノズル内部の流れについては直径が大きく抵抗は小さいのでここでは考慮しない。※管路・ダクトの流体抵抗（日本機械学会技術資料）

$$Q = \frac{\pi}{8\mu} P \left\{ a^4 - b^4 - \frac{(a^2 - b^2)^2}{\log a/b} \right\}$$

ここで、

Q：流量[m³/s]

P：圧力勾配[Pa/m] = { (h - L) / L } × ρ × g h：ガラスの液位[m]

L：上昇した液位[m] ρ：ガラスの密度[kg/m³]

μ：粘度[Pa·s] a：外径（流下ノズル外周部ガラスの外径）[m]

b：内径（流下ノズル内径）[m] g：重力加速度 [m/s²]

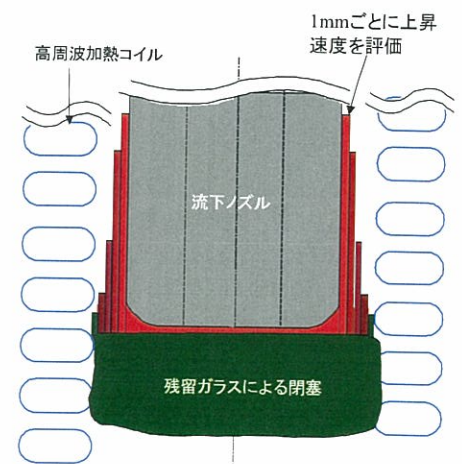
ガラスの上昇速度は、流下ノズル外周部ガラスの面積 A [m²] = π × (a² - b²) で流量を割って求められる。

$$\text{上昇速度 } F \text{ [m/s]} = Q / A$$

流下ノズルを□℃、高周波加熱コイルを□℃と仮定し、流下ノズルと高周波加熱コイルの間にガラスが充満していると仮定した場合の温度分布を評価し（図-2参照）、さらに、上記温度分布に基づき、流下ノズル下端からの距離ごとにガラス上昇速度を算出した（図-3参照）。（□℃以下は流動しないものとした。）

流下ノズル下端からの距離ごとの上昇速度分布に基づき、距離ごとの平均上昇速度を算定（図-4参照）した。

上昇するガラスの膜は実際には高周波加熱コイル側に流れて固まるということを繰り返すので、実際の上昇速度は円環の断面積比に応じて遅くなると考えられる（右図イメージ）ので、これを考慮した場合の流下ノズル上端までの到達時間は、約 60 分で流下ノズル上端まで上昇する計算結果となった。（図-5参照）



4. まとめ

計算結果より、全段加熱時間 (120 分) の範囲で流下ノズル上端まで上昇したことは十分に可能性があると考える。

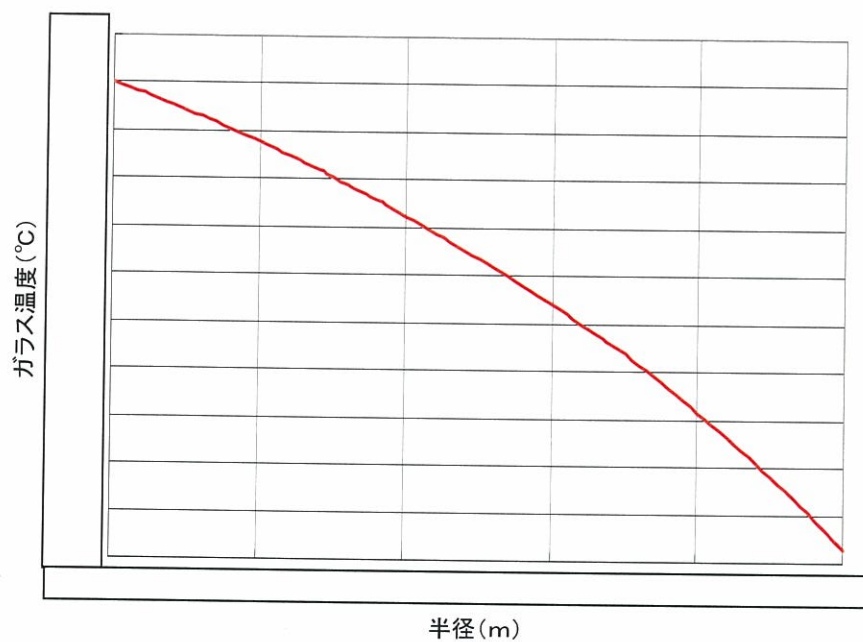


図2 流下ノズルー高周波加熱コイル間の温度分布

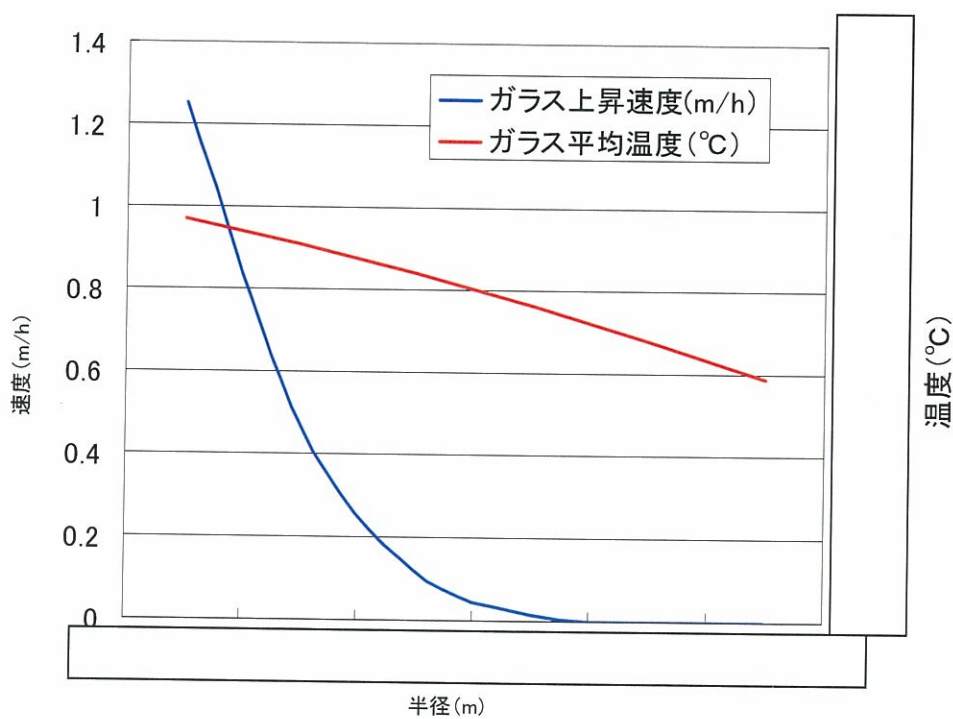


図3 流下ノズルー高周波加熱コイル間の温度分布及びガラス上昇速度

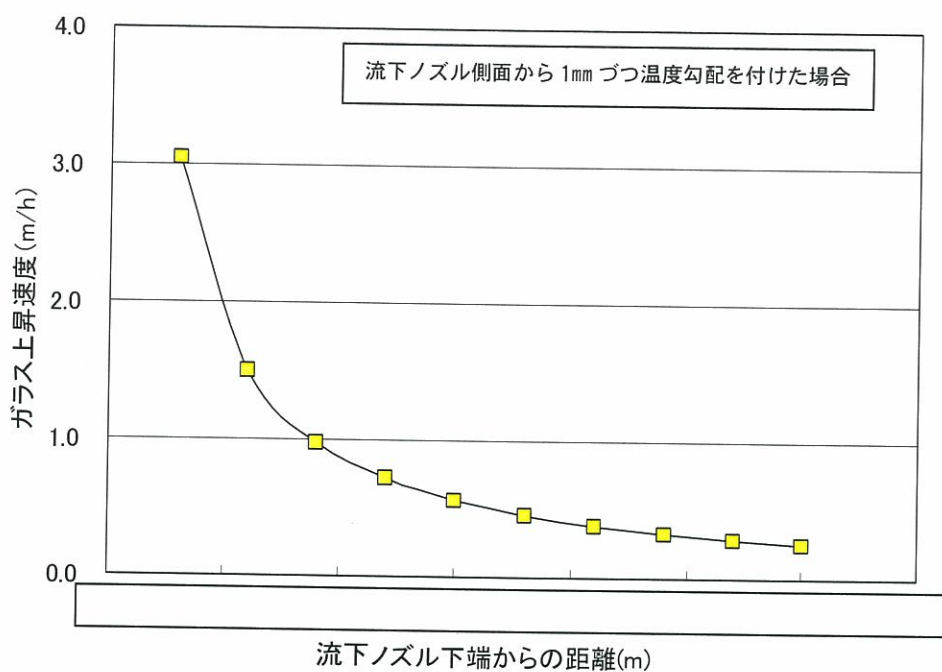


図4 ガラスの上昇速度

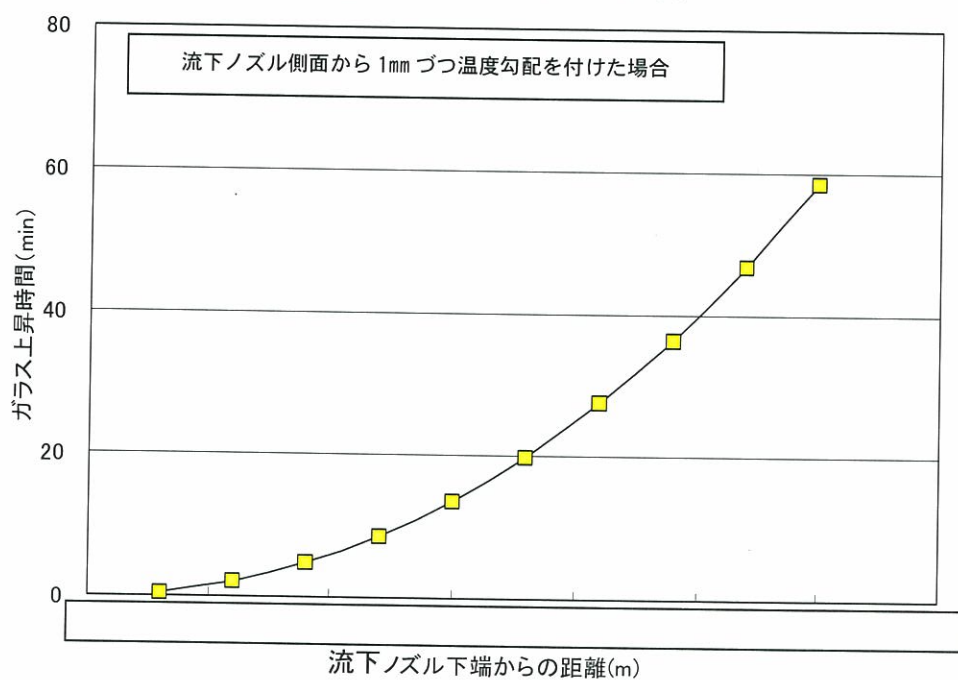


図5 ガラスの上昇時間

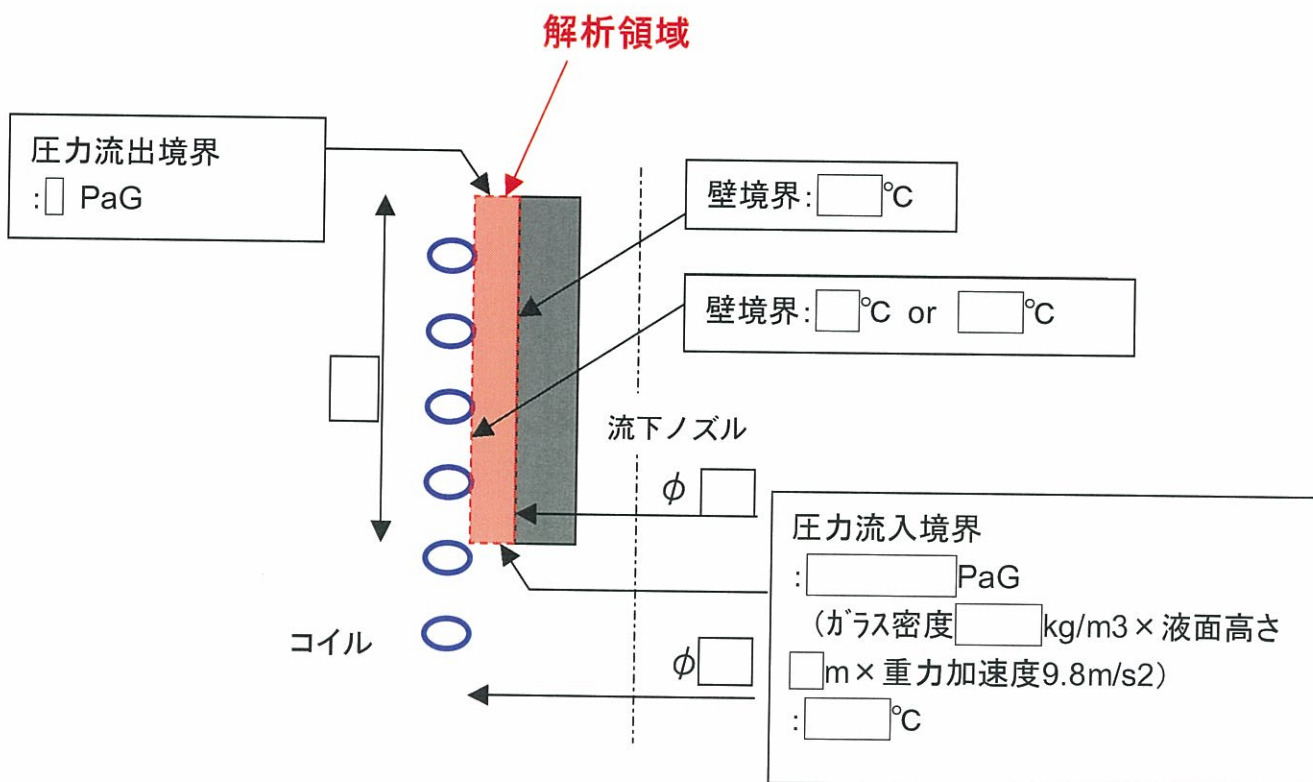
さらに、流下ノズルと高周波加熱コイル間におけるガラスの上昇を直接評価する熱流動解析を試みた。高周波加熱コイルー流下ノズル間の隙間をガラスで埋めるまでの時間の解析結果を次頁に示す。

高周波加熱コイル近傍で固化したガラスと高周波加熱コイルの間には大きな熱抵抗が考えられ、高周波加熱コイル側の境界温度条件は、軟化点を十分下回る °C とした。また、極端な例として、上昇流を保守的に評価するよう高周波加熱コイルの冷却温度 °C のケースを計算した。

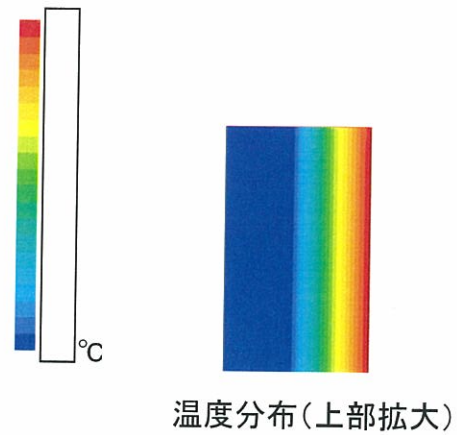
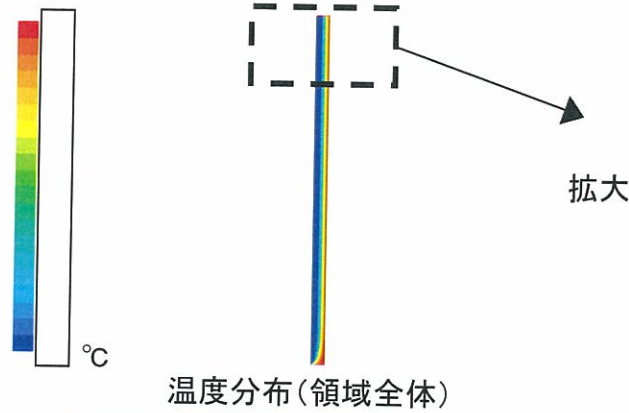
【解析領域と境界条件】

解析方法

- ・FLUENT6.3
- ・軸対称二次元
- ・定常
- ・ガラス粘性と熱伝導率は温度依存性あり



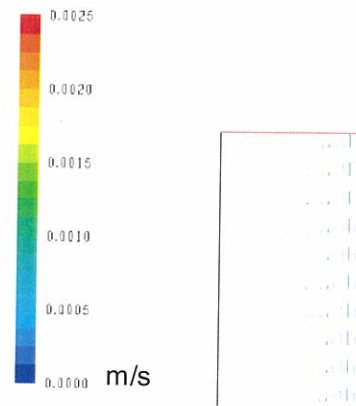
【解析結果 (高周波加熱コイル側壁温度=°C)】



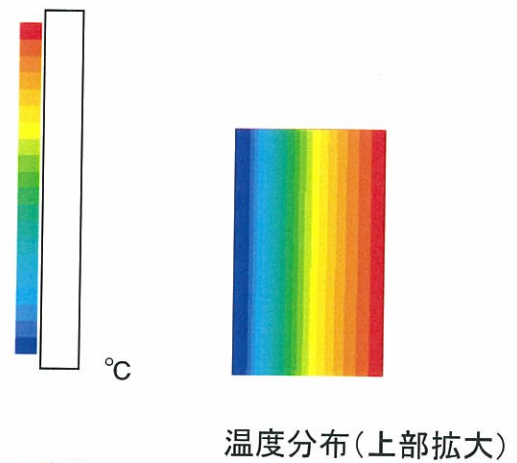
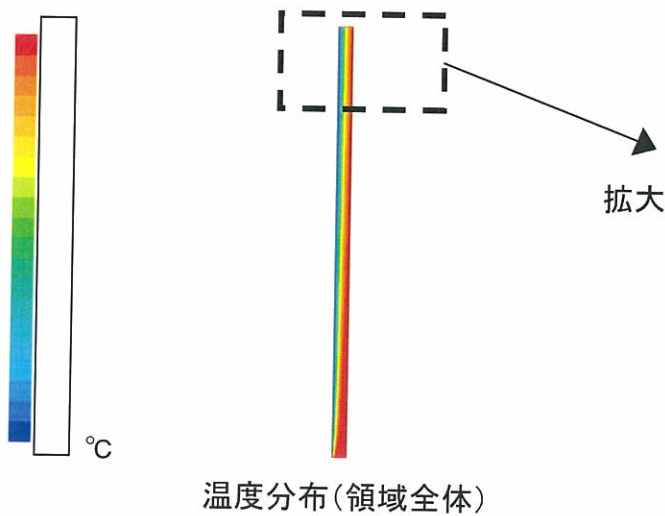
高周波加熱コイル温度 <input type="text"/> °C	質量流量kg/s <input type="text"/>
断面平均流速mm/s 0.1431	最大流速mm/s 0.878

高周波加熱コイルー流下ノズル間の隙間をガラスで埋める
⇒隙間体積を埋める時間

流速ベクトル(上部拡大)



【解析結果 (高周波加熱コイル側壁温度=°C)】



高周波加熱コイル温度 <input type="text"/> °C	質量流量kg/s <input type="text"/>
断面平均流速mm/s 0.5833	最大流速mm/s 2.318

高周波加熱コイルー流下ノズル間の隙間をガラスで埋める
⇒隙間体積を埋める時間

流速ベクトル(上部拡大)

