

TVF3 号溶融炉の炉底に関する詳細構造

Design Details of Bottom Shape for the 3rd Glass Melter in TVF

朝日 良光 嶋村 圭介 小林 秀和 小高 亮

Yoshimitsu ASAHI, Keisuke SHIMAMURA, Hidekazu KOBAYASHI and Akira KODAKA

核燃料・バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所
再処理廃止措置技術開発センター
ガラス固化部

Vitrification Department
TRP Decommissioning Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

March 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>)
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

TVF3号熔融炉の炉底に関する詳細構造

日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所

再処理廃止措置技術開発センター ガラス固化部

朝日 良光、嶋村 圭介*、小林 秀和、小高 亮

(2021年10月21日受理)

東海再処理施設では、使用済み核燃料の再処理に伴い発生した高レベル放射性廃液のガラス固化処理を、ガラス固化技術開発施設 (Tokai Vitrification Facility; TVF) に設置した液体供給式直接通電型セラミック熔融炉 (Liquid-Fed Ceramic Melter; LFCM) 方式のガラス熔融炉にて行っている。LFCM 方式のガラス熔融炉では、廃液に含まれる白金族元素の酸化物が析出して熔融ガラスの粘性が高まることで、熔融ガラスを流下し尽くした後にも粘性の高いガラスが炉内底部に残留する傾向がある。これがガラスの通電加熱特性に影響するのを防ぐため除去する必要があるが、この作業には時間を要する。固化処理を早期に完了するため、日本原子力研究開発機構では、白金族元素の炉内への蓄積量低減をねらった新しい炉へ更新する計画である。これまでの設計プロセスから、次期熔融炉の炉底・ストレーナ形状について複数の候補形状が考案されており、本報では、それらの中から、運転操作性や白金族元素粒子の排出性が現行熔融炉と同等以上の性能を持つ次期熔融炉の炉底・ストレーナ形状を選定する。

はじめに、考案された3種類の炉底形状に対し、ガラス固化体1本分を製造する熔融炉の運転について3次元熱流動計算を用いてシミュレートし、熔融炉内のガラス温度分布の推移を比較した。これらの結果に熔融炉としての技術的・構造的な成立性を加味し、次期熔融炉の炉底形状には傾斜角45°の円錐形状を採用した。

次に、5種類のストレーナ形状について3次元の CFD 計算を用いて流路抵抗と炉底付近に滞留する高粘性流体の排出割合を見積もり、それぞれ、現行炉と同等以上の性能を持つことを確認した。また、アクリル製の炉底形状模型を用いたシリコンオイルを充填・流下する実験を行い、流下中の流動場には流動抵抗を生じさせる渦が発生しないことを確認した。また、レンガ片による流下ノズル閉塞防止機能が十分な性能を持つことを確認した。これらの結果を踏まえてストレーナ形状を選定した。

Design Details of Bottom Shape for the 3rd Glass Melter in TVF

Yoshimitsu ASAHI, Keisuke SHIMAMURA*, Hidekazu KOBAYASHI and Akira KODAKA

Vitrification Department, TRP Decommissioning Center, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories,
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 21, 2021)

In Tokai Reprocessing Plant, the highly active liquid waste derived from a spent fuel reprocessing is vitrified with a Liquid-Fed Ceramic Melter (LFCM) embedded in Tokai Vitrification Facility (TVF). For an LFCM, the viscosity of melted glass is increased by the deposition of oxidation products of platinum group elements (PGE) and the PGE-containing glass tends to settle to the melter's bottom basin even after draining glass out. Removal of the PGE-containing glass is needed to avoid the Joule heating current from being affected by the glass, it requires time-consuming work to remove. For the early accomplishment of vitrifying the waste, Japan Atomic Energy Agency is planning to replace the current melter with the new one in which the amount of PGE sediments would be reduced. In the past design activities for the next melter, several kinds of shapes in regard to the furnace bottom and the strainer were drawn. Among these designs, the one in which the discharge ratio of PGE-containing glass would be as much as or greater than the current melter and which be able to perform similar operational sequences done in the current melter is selected here.

Firstly, an operational sequence to produce one canister of vitrified waste is simulated for three melter designs with a furnace bottom shape, using 3D thermal-hydraulic calculations. The computed temperature distribution and its changes are compared among the candidate structures. After discussions about the technical and structural feasibilities of each design, a cone shape with a 45° slope was selected as the bottom shape of the next melter.

Secondly, five strainer designs that fit the bottom shape above mentioned are drawn. For each design, the fluid drag and the discharge ratio of relatively high viscosity fluid resting near the bottom are estimated, using steady or unsteady CFD simulation. By draining silicone oil from acrylic furnace models, it was confirmed experimentally that there are no vortices that arise fluid drag in the vicinity of the strainer during discharge. Also, it was confirmed to satisfy that the function to avoid discharge nozzle from being blocked by debris of refractories in a case when the debris flaking. As a result, a strainer design was decided.

Keywords: TVF3 Glass Melter, Platinum Metal Sedimentation, Strainer Design

* OHARA Inc.

目次

1 背景と目的	1
2 炉底形状の選定	3
2.1 次期溶融炉に対する要求事項と検討項目	3
2.2 運転1バッチ分を想定した熱流動解析	3
2.2.1 流下開始までの加熱性	4
2.2.2 炉底の温度分布	4
2.3 技術的課題	5
2.4 結論	5
3 ストレーナ形状の選定	10
3.1 ストレーナに対する要求事項と検討内容	10
3.2 性能評価手法	10
3.2.1 候補形状の設定	10
3.2.2 性能の比較評価	11
3.3 評価内容	11
3.3.1 流路抵抗	11
3.3.2 渦の有無の評価	12
3.3.3 高粘性流体の排出割合の評価	12
3.3.4 スリット部の流速と貫通時間	13
3.4 結論	13
4 総括	22
謝辞	23
参考文献	24
付録 A アクリル模型を用いた流下実験	25
A.1 使用設備	25
A.2 実験条件	25
A.3 試験手順	25
A.3.1 シリコンオイルの調合と粘性係数の確認	25
A.3.2 シリコンオイルのアクリル模型への充填	26
A.3.3 流下試験	26
A.3.4 粘性係数測定	26
A.3.5 下層オイル排出割合の評価	26
付録 B 2層の粘性分布を持つ流体の流下シミュレーション手法	29
B.1 計算手法	29
B.2 炉底・ストレーナの形状モデル	29
B.2.1 TVF2号溶融炉モデル	29
B.2.2 TVF3号溶融炉モデル	30
B.2.3 境界条件	30
B.2.4 メッシュサイズの妥当性確認	30

B.3 2層に別れた流体の近似手法	32
B.3.1 流体の粘性係数	32
B.3.2 擬似粒子の運動方程式	33
B.3.3 粒子の初期配置と濃度計算手法	33
B.4 流下される流体の性状評価方法	34
B.4.1 下層の排出割合	34
B.4.2 流下された液の粘性係数	34
B.5 計算例.....	35
B.5.1 解析対象.....	35
B.5.2 計算条件.....	35
B.5.3 計算結果と評価	36

Contents

1	Background and Purpose	1
2	Selection of furnace bottom design.....	3
2.1	Requirements and considerations to the next glass melter.....	3
2.2	Thermal-hydraulic calculation for one batch operation	3
2.2.1	Heating rate before start discharging	4
2.2.2	Temperature distribution on furnace bottom face	4
2.3	Technical issues	5
2.4	Conclusion	5
3	Selection of strainer design.....	10
3.1	Requirements and considerations to the strainer.....	10
3.2	Means to estimate performance	10
3.2.1	Candidate designs	10
3.2.2	Comparative evaluation of performance	11
3.3	Evaluations	11
3.3.1	Drag force on flow channel.....	11
3.3.2	Observation of vortices existence	12
3.3.3	Discharge rate of high-viscos fluid	12
3.3.4	Fluid velocity in slit channels and time required to open channel	13
3.4	Conclusion	13
4	Summary.....	22
	Acknowledgement	23
	References	24
	Appendix A: Discharge experiments with acrylic models	25
A.1	Experimental installations.....	25
A.2	Experimental conditions	25
A.3	Experimental procedures.....	25
A.3.1	Preparation and checking the viscosity of silicone oil	25
A.3.2	Filling of silicone oil into acrylic model.....	26
A.3.3	Discharging	26
A.3.4	Viscosity measurement.....	26
A.3.5	Discharging ratio estimation of bottom layer.....	26
	Appendix B: Discharge simulation with two viscosity layers	29
B.1	Calculation method	29
B.2	Shapes of furnace bottom and strainer models.....	29
B.2.1	Model of TVF2 glass melter.....	29
B.2.2	Model of TVF3 glass melter.....	30
B.2.3	Boundary conditions	30
B.2.4	Checking adequacy of mesh size.....	30

B.3	Approximation method of two viscosity layers.....	32
B.3.1	Fluid viscosity	32
B.3.2	Equation of motion for pseudo-particle.....	33
B.3.3	Initial layout of particles and computing concentration	33
B.4	Estimation of discharged fluid properties	34
B.4.1	Discharge ratio of bottom layer.....	34
B.4.2	Viscosity of discharged fluid.....	34
B.5	Example of calculation.....	35
B.5.1	Analysis object.....	35
B.5.2	Conditions	35
B.5.3	Results and Remarks	36

表目次

表 2.1	検討した炉底形状.....	6
表 2.2	技術的課題の検討.....	6
表 3.1	ストレーナ候補形状の断面図、および、各部の寸法.....	15
表 3.2	スリット部平均流速と流路抵抗の評価結果.....	17
表 A.1	四角錐模型および円錐模型におけるストレーナ形状.....	27
表 A.2	原料および調合試料の 25[°C]における粘性係数と動粘性係数.....	27
表 B.1	アクリル製ストレーナ模型の各部の寸法、および、流下ノズル短縮した形状モデルのメッシュの品質.....	37
表 B.2	アクリル製ストレーナ模型の各部の寸法、および、流下ノズルの長さが実物どおりの形状モデルのメッシュの品質.....	37
表 B.3	メッシュの生成手法・調整パラメータ.....	38
表 B.4	計算条件.....	38
表 B.5	流下実験の計画と実測値、および、計算の条件.....	39
表 B.6	計算条件.....	40

図目次

図 1.1	TVF3 号溶融炉基本構造の断面模式図.....	2
図 2.1	TVF2 号溶融炉における運転操作.....	7
図 2.2	解析に用いた運転シーケンス	7
図 2.3	補助電極高さにおける溶融ガラス中心温度の推移.....	8
図 2.4	TVF2 号溶融炉再作動試験時に採取した流下ガラス中の白金族酸化物の濃度推移	9
図 2.5	溶融ガラス 56[kg]流下時における炉底温度分布.....	9
図 3.1	ストレーナ付近の断面模式図	18
図 3.2	ストレーナ付近の炉底部を見下ろした鳥瞰図 (a) TVF2 号溶融炉に相当する四角錐炉底、および、(b) TVF3 号溶融炉で採用した円錐炉底のイメージ図.....	18
図 3.3	ストレーナ形状を規定する形状要素の名称.....	18
図 3.4	四角錐炉底、ストレーナ形状 TVF2 における流下時の様子	19
図 3.5	円錐炉底、ストレーナ形状 TVF3A における流下時の様子.....	19
図 3.6	円錐炉底、ストレーナ形状 TVF3D における流下時の様子.....	19
図 3.7	円錐炉底、ストレーナ形状 TVF3E における流下時の様子	19
図 3.8	円錐炉底、ストレーナ形状 TVF3F における流下時の様子	19
図 3.9	排出割合の時間推移.....	20
図 3.10	堆積物の流れの模式図.....	20
図 3.11	2 層界面が各部を通過する時間	21
図 A.1	四角錐模型の外観.....	28
図 A.2	円錐模型の外観.....	28
図 B.1	TVF2 号溶融炉の解析用ストレーナ形状	41
図 B.2	TVF2 号溶融炉の底部電極と流下ノズルの接続部の形状モデル	42
図 B.3	TVF3 号溶融炉の底部電極と流下ノズルの接続部の形状モデル	42
図 B.4	TVF3 号溶融炉の亚克力模型試験用ストレーナ形状.....	43
図 B.5	円錐炉底用ストレーナ候補形状 TVF3A の解析用形状モデル外観.....	44
図 B.6	円錐炉底用ストレーナ候補形状 TVF3D の解析用形状モデル外観	44
図 B.7	円錐炉底用ストレーナ候補形状 TVF3E の解析用形状モデル外観.....	45
図 B.8	円錐炉底用ストレーナ候補形状 TVF3F の解析用形状モデル外観.....	45
図 B.9	解析モデルの速度境界条件を設定した面.....	46
図 B.10	解析モデルの圧力境界条件を設定した面.....	46
図 B.11	ストレーナ付近の谷部垂直断面における流速とせん断速度の計算結果.....	47
図 B.12	ストレーナ付近の垂直断面における流速とせん断速度の計算結果.....	47
図 B.13	流下ノズルの水平断面における流速 v_z の径方向分布.....	48
図 B.14	ストレーナ中央孔の水平断面における流速 v_z の径方向分布	48
図 B.15	流下速度	49
図 B.16	流下重量に対するストレーナ周辺の粘性分布	50

1 背景と目的

日本原子力研究開発機構（以下、JAEA と称す。）では、ガラス固化技術開発施設（Tokai Vitrification Facility : TVF）に設置されている液体供給式直接通電型セラミック溶融炉を用い、高レベル放射性廃液の固化処理を行っている。現在、保有する高レベル放射性廃液の固化処理を平成28年8月から数えて12.5年間で完了させる計画を実行中であり、固化処理計画を着実に遂行するため、現行の TVF2号溶融炉から次期溶融炉（TVF3号溶融炉）へ更新する計画である。

これまで、TVF1号溶融炉と TVF2号溶融炉において四角錐の炉底形状を採用してきた。TVF3号溶融炉の形状については、固化処理を確実に進める観点で、これまでに実証されていない技術は導入効果が高くとも取り入れず、改善効果が確実に見込まれる改良のみ取り入れる方針で設計している。このため、現在、設計・検討を進めている TVF3号溶融炉には、運転中に炉内に溜まる白金族元素粒子の速やかな流下を期待して、TVF のガラス溶融炉としては初めてとなる円錐炉底形状（図 1.1を参照）を採用する方向とした。その上で、円錐炉底形状に適合し、かつ2号溶融炉と同等以上の性能を持つストレーナ形状を検討し、炉底とストレーナが一体として性能上の問題がないことを確認した上で、円錐炉底形状を採用することを決定した。

本報では、TVF3号溶融炉として選定されたストレーナ形状の提案から決定までの検討経緯を整理した。特に、円錐炉底とストレーナを組み合わせた場合に、炉底に堆積する白金族元素粒子を速やかに流下することができ、かつ、運転中のいずれの段階においても問題が生じないことを確認する調査の結果をまとめた。

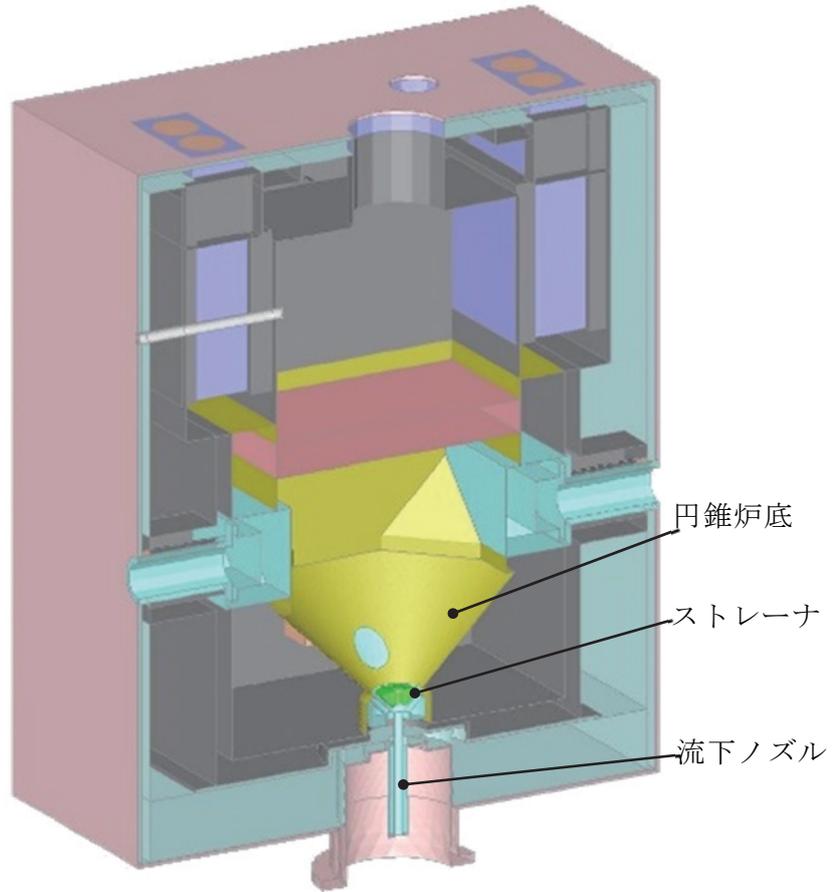


図 1.1 TVF3号溶融炉基本構造の断面模式図

2 炉底形状の選定

JAEA ではこれまでに、次期熔融炉の設計を平成26年度から平成29年度にかけて行い、検討した結果から炉底形状が3つの候補に絞られた。表 2.1に各候補の炉底部の形状を示す。表中の左から順に、傾斜面の角度が45°の四角錐形状（現行炉と同形状）、傾斜角45°の円錐形状、傾斜角が炉底の上部で45°、下部で60°の円錐形状である。本報では、これら候補の運転に関する特性や技術的な実現可能性を検討した結果を踏まえ、次期熔融炉の形式として一つを選定した。

2.1 次期熔融炉に対する要求事項と検討項目

炉底形状選定に係る検討項目と検討内容は次のとおり。

- イ) 運転性能： 現行の TVF2号熔融炉と同様の運転操作（炉底低温運転）が円錐炉底形状で成立するか検討した。
- ロ) 白金族元素粒子の排出性： 炉底形状の違いによる白金族元素粒子の排出性を比較した。
- ハ) 技術的課題： 熔融炉の設計や運転条件など、技術的な実現可能性を各炉底形状で検討した。

このうち、イ) と ロ) の検討項目については、ガラス固化体1本を製造する熔融炉の運転（1バッチ）を想定した熱流動解析を行うことで確認した。ハ) の技術的課題の検討では、イ) と ロ) の検討結果や炉構造の成立性、モックアップ試験の必要性の有無など、技術的な実現可能性を総合的に検討し炉底形状を決定した。

2.2 運転1バッチ分を想定した熱流動解析

TVF2号熔融炉の運転操作は図 2.1に示すように、①前のバッチで流下した際に加熱された炉底付近のガラス温度を下げる炉底冷却、②炉底付近のガラスの粘性を低く保ち白金族元素粒子の沈降・堆積を抑制する炉底低温運転、③流下を開始した初期段階で流下速度を速やかに上昇させるためにあらかじめ炉底を加熱する炉底加熱、そして、④ガラス流下の4段階に分けることができる。熔融ガラスの温度は、各電極間に流す電流や電極内部に設けられた冷却空気の流路へ流す空気の流量を調整するなどで制御している。TVF2号熔融炉において炉底低温運転の段階では、補助電極高さの熔融炉中心位置におけるガラス温度（中心ガラス温度）が850[°C]を超えないよう、補助電極内部に設置された温度計の測定値を参照しながら電流を制御している。また炉底加熱の段階では、補助電極の温度が所定の値になるまで加熱した後に流下段階へ移行するが、そのときの中心ガラス温度は、平成28年度の基本設計で実施された数値計算において975[°C]と見積もられている。以上を踏まえ、現行熔融炉と同等な運転が次期熔融炉でも行えることを示す基準として、中心ガラス温度が炉底低温運転時に850[°C]以下、かつ、炉底加熱時に975[°C]以上とできることを確認した。

各炉底形状に対し、1バッチ分の運転を想定し、補助電極高さにおける中心ガラス温度の推移を見積もった。計算の境界条件として入力する通電加熱の電流や電力、冷却量、ガラスの流下速度のデータは、固化セル搬入前の TVF2号熔融炉をモックアップ試験棟に設置して平成15年11月に実施したコールド試験の7バッチ目のデータを参考に作成した。図 2.2に、計算に使用した各電極間の通電電流、主電極間通電で加熱する電力、ガラス流下時の速度、底部電極の冷却量を示す。図 2.3(a)に、補助電極高さの中心ガラス温度推移の計算結果を示す。炉底低温運転の期間に相当する5～37時間に着目すると、3ケースともに中心ガラス温度は850[°C]以下で推

移しており、かつ、炉底加熱時には975[°C]以上に上昇しており、いずれの形状も現行炉と同等の運転ができることを確認した。

2.2.1 流下開始までの加熱性

図 2.3(b)に示す各炉底形状での中心ガラス温度推移から、流下開始へ移行できるかの判断基準である、補助電極高さの中心ガラス温度が975[°C]に達するまでの加熱時間を比較した。現行炉と同じ45°四角錐では975[°C]に到達するまでに6時間かかる一方、45°円錐および60°円錐はそれぞれ4.2時間、3.2時間で到達しており、60°円錐は現行炉に比べ47%加熱時間を短縮できることが分かった。同じ通電量でも加熱性が向上する理由は、炉底形状を円錐形状にすることによって、四角錐形状の場合よりも炉底付近の容積が小さくなるためである。

白金族元素粒子の沈降・堆積抑制の観点からは、白金族元素粒子の沈降速度はガラスの粘性が大きいほど遅いので、定性的には炉底部の加熱時間は短い方が有利と考えられる。実際、ガラスの温度を低く保ちガラスの粘性を大きくすることが有効であることが報告されている²⁾。従って、補助電極高さの中心ガラス温度を現行炉よりも早く上昇させることができる45°円錐と60°円錐の炉底では、白金族の沈降抑制効果が向上すると考えられる。

2.2.2 炉底の温度分布

ガラスの粘性は温度によって変化するため、炉底部に不均一な温度分布が存在すると、流下したときに、ガラスが流れにくい場所とそうでない場所が存在することになる。流れにくい場所では、その他の場所よりも白金族元素粒子が長時間滞留することになるため、ガラスを滞りなく流下し白金族元素粒子の排出性を向上させるためには、炉底の温度分布は均一である方が有利である。本項では、白金族元素粒子の排出性に有利な炉底形状を調べる目的で、炉底形状ごとに、流下重量が56[kg]となる時点の炉底温度分布を比較した。なお、TVF2号溶融炉再作動試験時に採取した流下ガラスに含まれる白金族酸化物の濃度推移（図 2.4）からは、炉内の白金族酸化物濃度が飽和する高模擬廃液供給試験の3バッチ目以降、流下重量50[kg]近傍で比較的高い白金族含有率のガラスが流下されていることが分かっている。

45°四角錐、45°円錐および60°円錐の各炉底について、溶融ガラス56[kg]流下時における炉底の温度分布を計算した結果を図 2.5に示す。45°四角錐炉底では、溶融ガラスの温度が低い領域が谷部に沿って存在するため、この領域においてはガラスの粘性が高まり流動性が低くなると考えられる。加えて、四角錐の谷部は、平面部よりも傾斜角が緩やかであることから、高濃度の白金族元素粒子を含むガラスは谷部に残留し易いと考えられる。実際、モックアップ試験および過去のTVFガラス溶融炉において、溶融ガラスを全量排出する操作（ドレンアウト）をした後に観察した結果、比較的高い濃度で白金族元素粒子を含んだガラスは谷部に残留している。一方、円錐形状においては、炉底温度分布の不均一性が四角錐炉底よりも小さく、谷部も存在しないことから、ガラスが残留しやすい領域は存在しなかった。以上の結果より、円錐炉底の方が四角錐炉底と比較して白金族元素粒子の排出性が向上し、炉内残留が抑制されると考えられる。

2.3 技術的課題

表 2.2に、技術的課題の一覧表を示す。現行炉と同等以上の性能であることを判断基準とし、形状毎に相互的な比較評価を行った。

(1) 45°四角錐と45°円錐の比較

製作した炉を固化セルへ据え付けた場合に、既設配管（特に、ガラス原料カートリッジ供給配管）との取り合いの成立性を確認するため、熔融炉高さを評価した。ガラスの容積を現行炉と同等とした場合でも45°円錐炉底の熔融炉の高さは現行炉と概ね同等（+27[mm]）であり、既設配管や熔融炉下部の構造に変更を加えることなく据え付けることが可能である。廃液の処理能力については、両形状ともに現行炉と同じガラス熔融表面積となるよう設計しており、ガラス熔融速度や廃液処理速度は同等であると見積もられる。流下開始前の昇温時間については、熱流動解析の結果から、炉底が45°円錐になることで流下前の昇温時間を45°四角錐よりも30%短縮できることを確認している。加えて、円錐形状の方が炉底温度の不均一性は小さく、谷部も存在しないことから均一な流動が得られるため、白金族元素粒子の排出性は向上すると考えられる。45°円錐炉底形状は現行炉の45°四角錐炉底から大幅な変更はないため、運転特性の把握を目的としたモックアップ試験は不要であると考えられる。

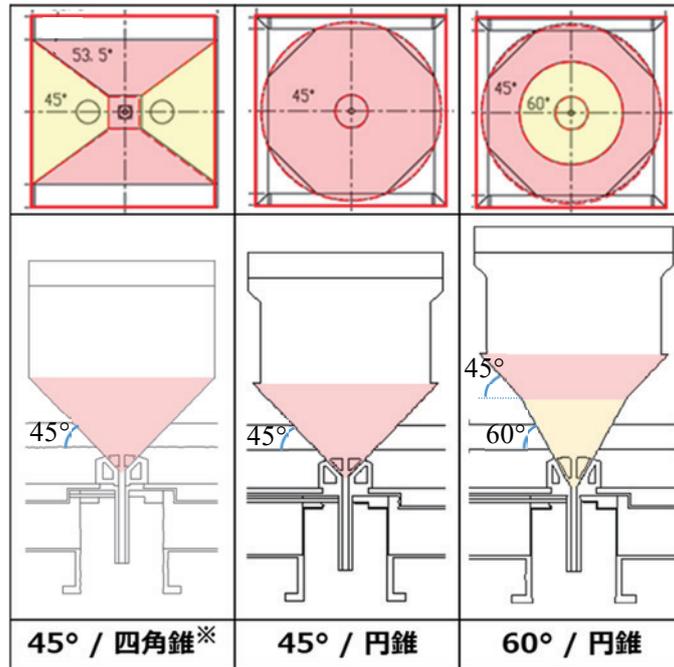
(2) 45°四角錐と60°円錐の比較

60°円錐炉底の熔融炉高さは現行炉より118[mm]高くなるため、既設配管との取り合いを成立させるためには、流下ノズルの位置を下げる必要があるものの、設計上は成立することを確認している。処理能力に関しては、両形状ともに熔融表面積が同じになるよう設計しているため同様である。熱流動計算の結果より、60°円錐になることで流下開始前の昇温時間が47%短縮されると見積もられた。加えて、傾斜角が大きくなることで、炉底面上の堆積物にかかる重力成分や、同一の流下速度で流下した場合の傾斜面にかかるせん断応力が大きくなるため、白金族元素粒子の排出に有利と考えられる。しかしながら、炉底部の大幅な変更により炉内温度分布や流動性が現行炉から大きく変化して運転操作性が変わるため、運転特性の把握に長期間のモックアップ試験を要する。

2.4 結論

技術開発に伴う熔融炉更新スケジュール遅延のリスクを最小限に抑えつつ、白金族元素粒子の排出性の向上が期待できる45°円錐の炉底形状を次期熔融炉の基本構造とした。

表 2.1 検討した炉底形状



※ 45°四角錐は現行炉と同形状である。

表 2.2 技術的課題の検討

検討項目	45°四角錐	45°円錐	60°円錐
熔融炉高さ	○: 現行炉と同様	○: TVF2号と概ね同等	△: 現行炉より高くなるが、設計上の実現性は、確認済み
処理能力	○: 現行炉と同様	○: 現行炉と同様	○: 現行炉と同様
流下開始前の昇温時間	6時間	4.2時間 (30%短縮)	3.2時間 (47%短縮)
炉底低温運転	○: 可能	○: 可能	○: 可能
炉内温度分布	○: 現行炉と同様	◎: 炉底温度分布の不均一性は小さい	◎: 炉底温度分布の不均一性は小さい
白金族元素排出性	○: 現行炉と同様	◎: 谷部がない為、均一な流動が得られる。	◎: 谷部がない為、均一な流動が得られる。
運転条件の確認試験 (モックアップ試験)	○: 現行炉と同型のため、不要である。 (過去の運転実績あり)	○: 現行炉から大幅な変更はないため、不要である。	△: 炉底の大幅な変更により、運転性が変わるため、必要である。

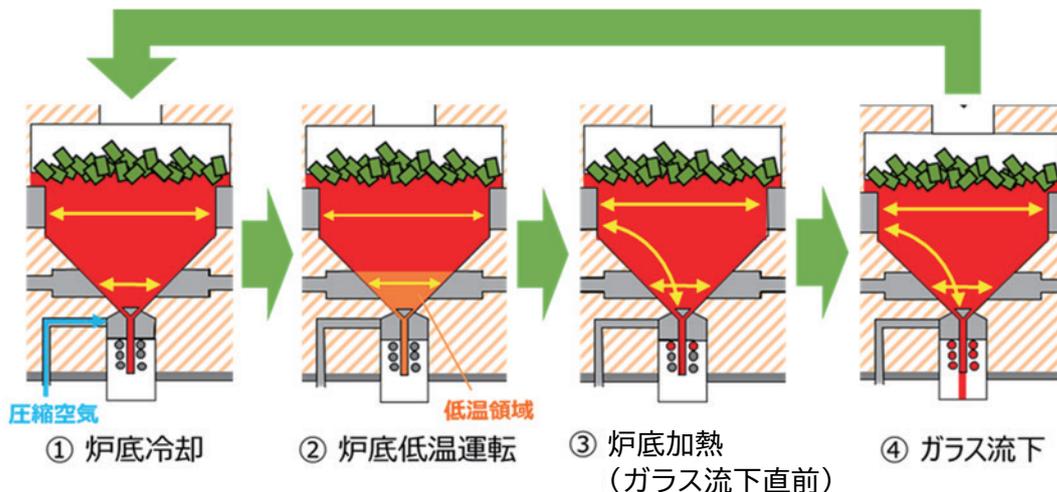


図 2.1 TVF2号溶融炉における運転操作

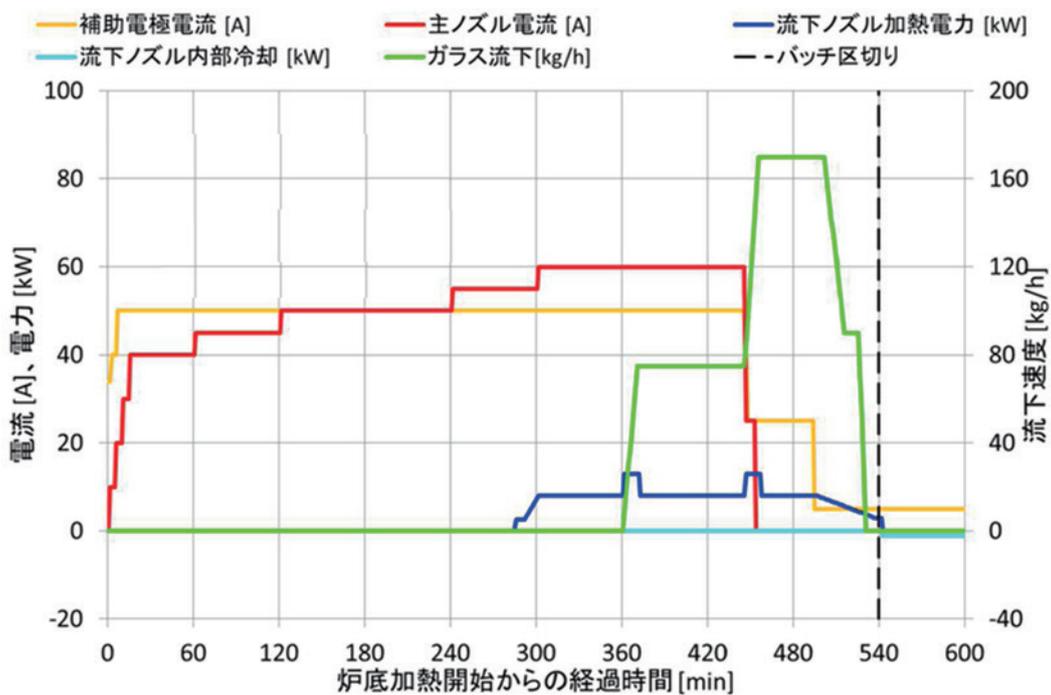


図 2.2 解析に用いた運転シーケンス

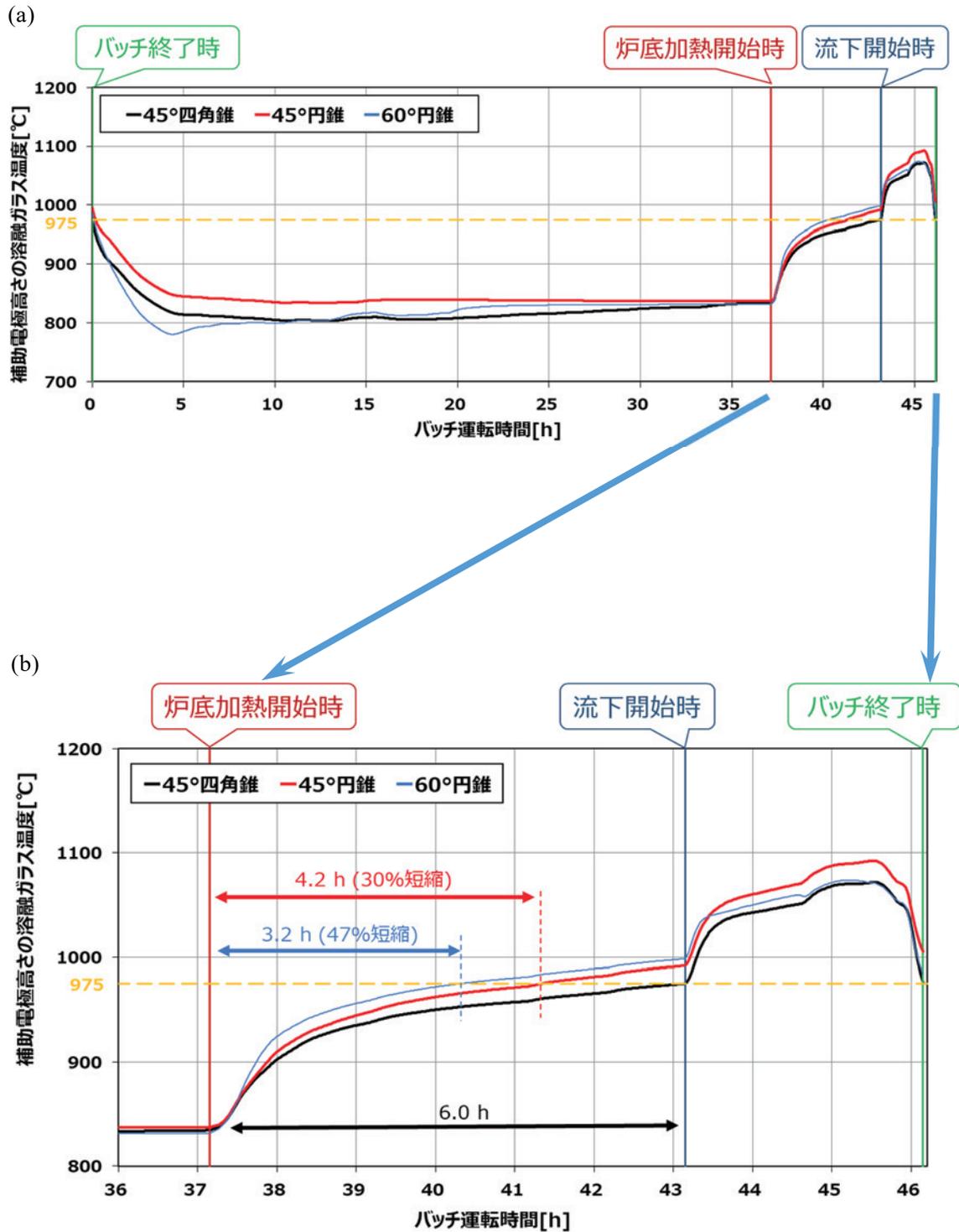


図 2.3 補助電極高さにおける溶融ガラス中心温度の推移

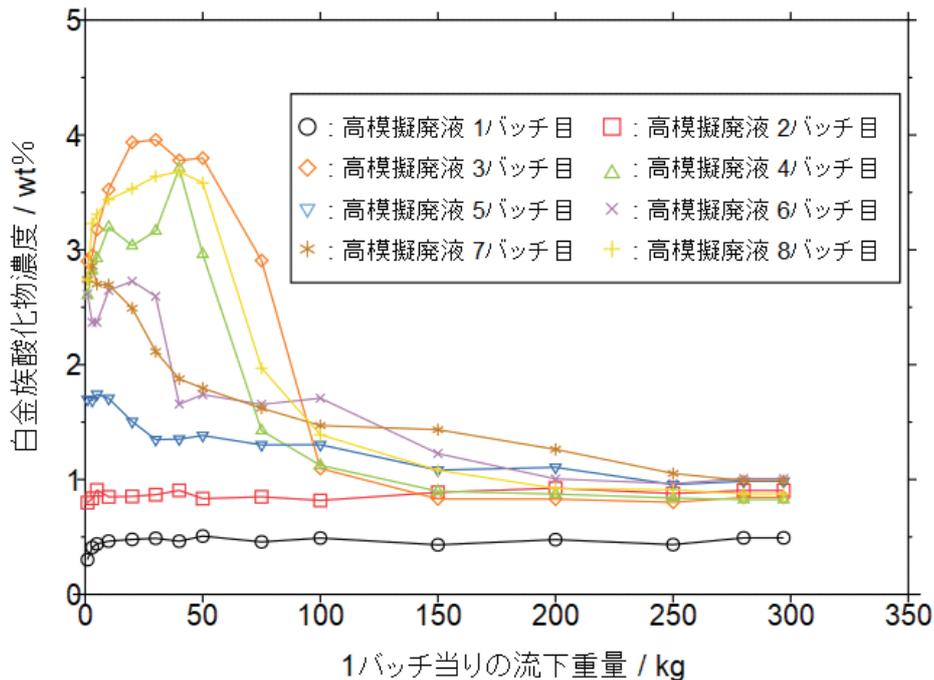


図 2.4 TVF2号溶融炉再作動試験時に採取した流下ガラス中の白金族酸化物の濃度推移

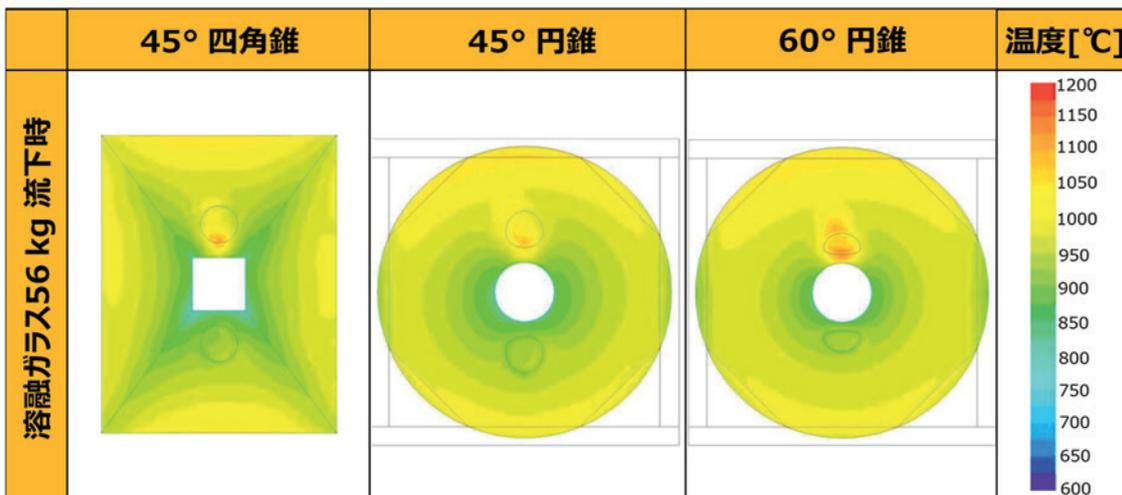


図 2.5 溶融ガラス56[kg]流下時における炉底温度分布

3 ストレーナ形状の選定

ガラス固化技術開発施設の次期溶融炉（TVF3号溶融炉）には、炉底形状に傾斜角45°の円錐を採用すること、および、円錐炉底との組み合わせに適した形状のストレーナを設置することを第2章で説明した。ストレーナとは、円錐の頂点にあたる炉底の下端、すなわち、流下ノズルの直上に設置される金属製の構造物（図 1.1、および、図 3.1を参照）である。NCF690合金製で、底部電極と電氣的・構造的に一体となっており、炉の内壁を構成するレンガが万が一剥離した場合に備えた流下ノズルの閉塞防止や、ジュール加熱の電極としての役割を持っている。運転中の TVF 溶融炉の炉底付近は、ガラス温度を低く制御することや、白金族元素粒子が沈降して濃度が高まることから、比較的高い粘性の溶融ガラスが滞留しており、流下時にはストレーナの周囲を通して排出される（以下、炉底付近の粘性が高い液体を「高粘性流体」と称す）。従ってストレーナの形状には、電極や流下ノズル閉塞防止の機能だけでなく、炉底の高粘性流体が滞りなく排出できることも求められる。

本報では、傾斜角45°の円錐炉底と組み合わせて最適なストレーナ形状を選定する。この際の基本的な方針として、研究開発に伴うリスクを負わないことを考え、ストレーナ周辺の形態は現行炉からわずかな変更に限ることにした。形状の選定にあたっては、形状の違いによる性能を比較評価する指標の構築が課題となる。はじめに、ストレーナに対する要求事項を整理し、それに対応した検討すべきことを整理した。この内容を第3.1節に示す。次に、評価手法を第3.2節に示す。その上で、評価した内容を第3.3節にて説明し、結論を第3.4節に示す。

3.1 ストレーナに対する要求事項と検討内容

ストレーナが担う電極としての役割については、その性能に関する検討・評価を TVF3号溶融炉基本設計において実施し、主電極-底部電極間に100[A]通電した場合にもストレーナ表面での電流密度が許容値を超えないことを以って、上面傾斜角を5.4°と設定した。本報では、ストレーナの電極としての性能や閉塞防止機能を前提条件とし、その上で要求される高粘性流体を排出する性能として、

- A) 流下速度が現行炉と同等以上
- B) 剥離レンガ片による流下ノズルの閉塞防止
- C) 高粘性流体の排出に対する有利性

を要求事項とした。これに対して、

- a. 流路抵抗が現行炉を上回らない形状
- b. スリット幅の最適化
- c. 高粘性流体の排出割合やスリット部の流速が大きくなる形状

を検討した。

3.2 性能評価手法

3.2.1 候補形状の設定

ストレーナの候補形状を設定するにあたり、前提条件として、形状は円錐炉底形状に適合する形状とした。TVF2号溶融炉では、図 3.2(a)に示す通り、四角錐形状の炉底に上面形状がおお

よそ四角形のストレーナを設置しているが、TVF3号熔融炉では大幅な形状の変更はせず、図 3.2(b)に示すような円形とした。すなわち、図 3.3に示す形状要素の寸法を定めることで規定される形状であることとし、各部の寸法を調整することで候補形状を設定した。第3.1節で述べた通り、ストレーナ上面傾斜角は5.4°で既定とし、その他の形状要素の寸法を変数に、製作上の都合も考慮した上で、表 3.1に示す7種類の候補形状を設定した。最も左側の TVF2と呼称する形状は、TVF2号熔融炉で採用した形状である。この形状から、各部の寸法を同一のままに、概形を四角錐から円錐に変更した候補形状を基本ケース TVF3A'とした。更に、TVF3A'から一部の寸法を変更した候補形状のケースとして TVF3A~F を設定した。

3.2.2 性能の比較評価

ストレーナ形状を規定する一つひとつの形状要素に対し、寸法をいくらししたときにストレーナとして有利な特性を持つか、先述した a~c の検討項目に対応する性能の評価を行った。

また、候補形状が持つ特性が現行炉の性能と同程度以上であることを確認できるよう、候補形状 TVF3A~F に加えて、比較用に現行炉のストレーナ形状の性能も同時に調査した。はじめに、現行炉と同等以上の流下速度を実現できるスリット幅を調査するため、スリット幅やノズル付け根の曲率半径が異なる候補形状ごとに、流路抵抗を定常 CFD 計算で見積もった。次に、中央孔頂部や外縁部の曲率半径が異なる候補形状ごとに、アクリル製の炉底・ストレーナ模型に炉内のガラス粘性分布を模擬した流体(シリコンオイル)を充填し、流下する実験を行い、顕著な渦の有無を確認した。最後に、この実験条件と同等な非定常 CFD 計算を行い、高粘性流体の排出割合やスリット部の流速推移を見積もった。

3.3 評価内容

3.3.1 流路抵抗

(1) 解析のねらい

現行炉と同等以上の流下速度を実現できるスリット幅を探索する。

(2) 計算条件

3次元の流体計算コードによる定常計算を行った。温度は流下初期の炉底付近の条件に合わせて、950[°C]とした。そのときの熔融ガラスの粘性係数は、次の式³⁾

$$\log_{10} \eta = \frac{1790}{T - 425} - 1.69 \quad (\text{ただし、温度 } T[\text{°C}]、\text{粘性係数 } \eta[\text{Pa} \cdot \text{s}]) \quad (3-1)$$

から決定した。この式は、温度950、1000、1050[°C]における TVF 固化体標準ガラス組成 P0798⁷⁾のガラス粘性を共軸二重円筒形回転粘度計で測定し、値を Fulcher の式⁴⁾に基づいて表した実験式である。流下速度は TVF 熔融炉における標準的な流下の初期に相当する75[kg/h]とした。

(3) 結果・評価

結果を表 3.2に示す。ノズル付け根は丸みを付けた方がスリット部の流速が向上した。このことから、ノズル付け根は曲率半径が R50[mm]のベルマウス形状とした。また、いずれのスリット幅も現行炉より流路抵抗を低減できることが分かった、従って、レンガ片による流下ノズル閉塞のリスクを伴うスリット幅の変更は不要となった。よって、スリット幅は現行炉と同じ10[mm]とした。

3.3.2 渦の有無の評価

(1) 実験のねらい

流れに渦が生じると流路抵抗が生じ、高粘性流体の排出に不利であることから、流下中の渦の有無を確認する。

(2) 炉底形状・ストレーナ形状

炉底部を透明なアクリル製の実物大模型で再現した。炉底形状は、2号溶融炉と同じ四角錐模型、および、3号溶融炉で採用した円錐模型の2つである。四角錐模型にはストレーナ形状 TVF2、円錐模型にはストレーナ形状 TVF3A、TVF3D、TVF3E、TVF3F を組み合わせた。

(3) 実験方法

上下2層に粘度が異なるシリコンオイルを充填することでガラスの粘度分布を模擬し、流下させた。流下速度は、流下ノズル途中にあるボール弁の開度で調整した（付録 A 参照）。

(4) 実験条件

TVF 溶融炉において、流下初期（流下重量が100[kg]に至るまで）の流下速度は60~80[kg/h]に制御されており、この状況を模擬した実験条件を設定した。シリコンオイルの流下速度は、体積流量が溶融ガラスと同じになるよう密度を用いて換算し、約24~32[kg/h]とした。流下初期における溶融ガラスの温度を、上層が1050[°C]、下層が950[°C]と想定し、粘度を上層と下層で、それぞれ、表 A.2に示す値に調整した。これにより、系のサイズと流れの様相に関する指標であるレイノルズ数 ($Re = \rho v L / \mu$) を TVF 溶融炉に合わせた。炉底付近のガラスは上部に比べて温度が低く、密度差に起因する対流は生じないので、グラスホフ数 (Gr) は考慮せず実験は室温で行った。したがって、熱伝達に関する物性の指標であるプラントル数 (Pr) も考慮しなかった。下層はストレーナ上端から8[cm]上まで充填し、上層は液面がストレーナ周辺の流れに影響を与えない程度の十分に高い位置（ストレーナ上端から21[cm]上）まで充填した。その他の詳細は付録 A に示す。

(5) 実験結果

炉底形状が45°四角錐のストレーナ形状 TVF2について、流下中のストレーナ付近を撮影した写真を図 3.4に示す。上層オイルははじめに中央孔を貫通し、続いてスリット部を貫通する様子が確認された。また、流下開始から10分の時点では、壁面には滞留する下層オイルが見られた。45°円錐の炉底形状を用いた実験の流下中のストレーナ付近を撮影した写真については、ストレーナ形状 TVF3A を図 3.5に、TVF3D を図 3.6に、TVF3E を図 3.7に、TVF3F を図 3.8にそれぞれ示す。実験したどの形状にも、渦の発生は見られなかった。

3.3.3 高粘性流体の排出割合の評価

(1) 解析のねらい

白金族元素粒子の排出に有利な特性、すなわち、スリット部の流速が速く、炉底の高粘性流体の排出割合が高いストレーナ形状を探索する。

(2) 方法

非定常の3次元 CFD 計算により、初期状態で上下2層の粘性分布を持つ流体を流下させた。計算には、JAEA において開発している溶融炉解析システム⁵⁾と粒子挙動モデル⁶⁾を用いた。流路形状は、第3.3.2項の実験と同様に、四角錐炉底の TVF2、円錐炉底の TVF3A、TVF3D、TVF3E、

TVF3F を適用し、下層に充填された高粘性流体の排出割合と各部の流速を見積もった。下層の領域にトレーサー粒子を配置し、トレーサー粒子の濃度に応じて粘性係数が規定される Newton 流体を仮定した。計算モデルや計算手法に関する詳細は付録 B で説明する。

(3) 計算条件

粘性係数は上層で19.4[Pa·s]、下層で5.83[Pa·s]とした。いずれの流路形状においても下層の充填量は3.5[L]となるように、モンテカルロ法で下層の体積を見積もって初期状態における上層と下層の界面高さを設定した。

(4) 結果

排出割合の時間推移を図 3.9に示す。外縁部の曲率半径は R5[mm]としたほうが、R0[mm]とするよりも排出割合が高いことが分かった。また、計算したいずれの候補形状も、TVF2の排出割合を上回った。

3.3.4 スリット部の流速と貫通時間

(1) 評価のねらい

炉底の傾斜面に堆積した堆積物は、図 3.10の模式図に示すように、流下時には傾斜面に沿ってスリット部を通過して流下される。そのため、スリット部の流速が大きくなるストレーナ形状が傾斜面に滞留する高粘性流体の排出に有利である。このため、スリット部の流速が大きくなるストレーナ形状を調べた。

(2) 方法

非定常の3次元 CFD 計算により、2層の界面がストレーナ近傍の各所を通過する時間を調べた。ここでは、時々刻々と変化する粘性係数分布のなかから18[Pa·s]の等値面を抽出し、それを2層界面とみなして通過時間を調べた。

(3) 結果

結果を図 3.11に示す。特に TVF2が中央孔の貫通が早く、スリット部の貫通が遅かった。調査したいずれの候補形状も、スリット部貫通に要する時間は TVF2よりも早かった。スリット部の貫通が最も早かったストレーナ形状は TVF3D、次いで TVF3F であった。この2つのストレーナ外縁部の曲率半径は、今回調査した中ではもっとも大きい R5[mm]であることから、外縁部に丸みを付けたほうがスリット部の貫通が速くなることが分かった。

3.4 結論

第3.3.1項では、流路抵抗やスリット部の流速と流下ノズル閉塞防止の観点から、スリット幅10[mm]、ノズル付け根のベルマウスは曲率半径 R50[mm]を選定した。第3.3.3項と第3.3.4項では、高粘性流体の排出割合とスリット部の貫通時間から、外縁部の丸み R5[mm]、中央孔頂部の丸み R10[mm]を選定した。選定された形状要素を全て組み合わせた形状は、表 3.1に示したストレーナ候補形状の TVF3D に相当する。この候補形状は、評価したどの項目においても現行炉の性能を下回ることがなかった。よって、円錐炉底に適したストレーナ形状として、ストレーナ形状 TVF3D を選定した。

This is a blank page.

表 3.1 ストレーナ候補形状の断面図、および、各部の寸法

呼称	TVF2 (現行炉)	TVF3A' 基本ケース	TVF3A	TVF3B	TVF3C	TVF3D	TVF3E	TVF3F
断面図			(同左)					
概形	四角錐	円錐	円錐	円錐	円錐	円錐	円錐	円錐
中央孔頂部 曲率半径	R10	R10	R10	R10	R10	R10	<u>R20</u>	<u>R20</u>
中央孔内径	26	26	26	26	26	26	26	26
外縁部 曲率半径	R1	R1	R1	R1	R1	<u>R5</u>	R1	<u>R5</u>
スリット幅	10	10	10	15	7.5	10	10	10
ノズル付け根 曲率半径	R0.5以下	R0	<u>R50</u>	<u>R50</u>	<u>R50</u>	<u>R50</u>	<u>R50</u>	<u>R50</u>
上面傾斜角	5.4°	5.4°	5.4°	5.4°	5.4°	5.4°	5.4°	5.4°
各部分名称								

※ 単位は、特に記載がない場合は[mm]。下線太字は基本ケースと異なる寸法であることを意味する。

表 3.2 スリット部平均流速と流路抵抗の評価結果

	TVF2	TVF3A'	TVF3A	TVF3B	TVF3C
スリット幅 [mm]	10	10	10	<u>15</u>	<u>7.5</u>
ノズル付け根 [mm]	R0	R0	<u>R50</u>	<u>R50</u>	<u>R50</u>
スリット部平均流速 [mm/s]	0.64	0.79	0.82	0.81	0.72
流路抵抗の改善 [Pa]	0 (基準)	222	538	1103	101

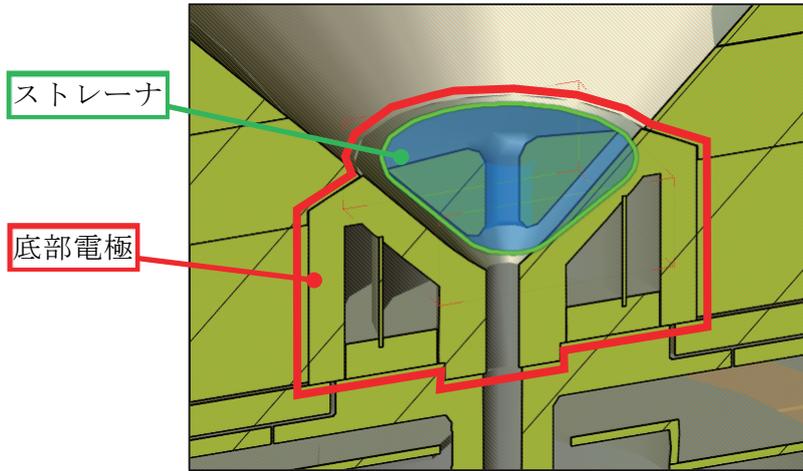


図 3.1 ストレーナ付近の断面模式図

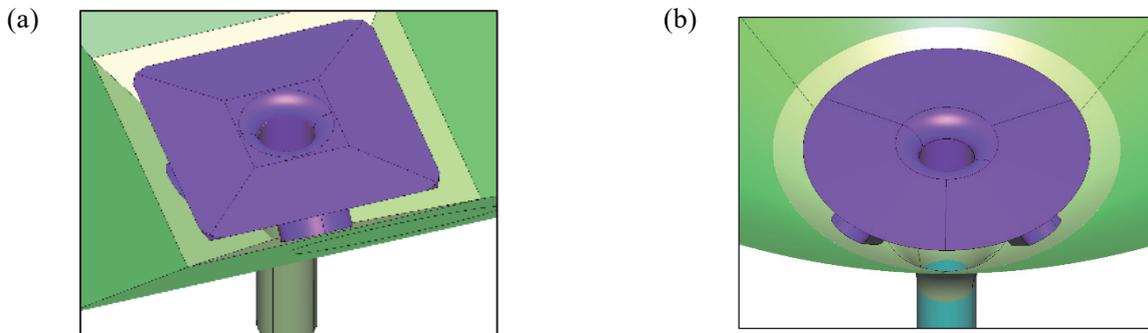


図 3.2 ストレーナ付近の炉底部を見下ろした鳥瞰図 (a) TVF2号熔融炉に相当する四角錐炉底、および、(b) TVF3号熔融炉で採用した円錐炉底のイメージ図

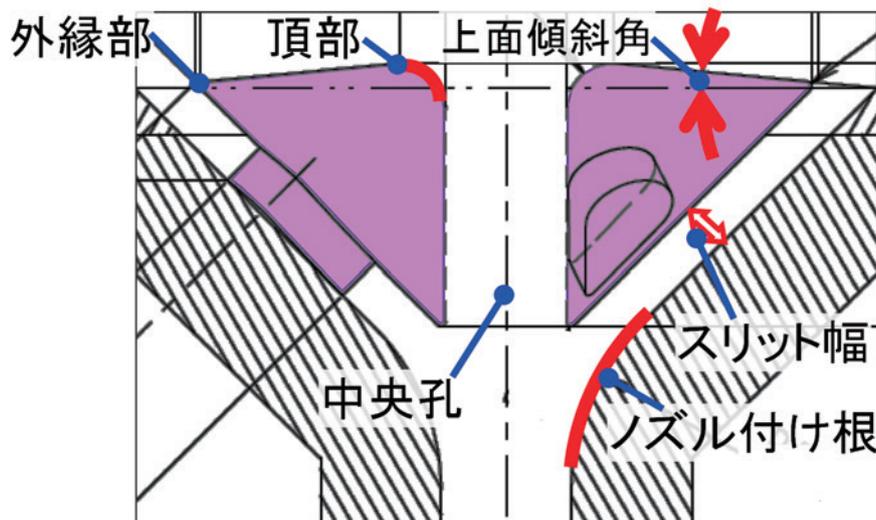


図 3.3 ストレーナ形状を規定する形状要素の名称

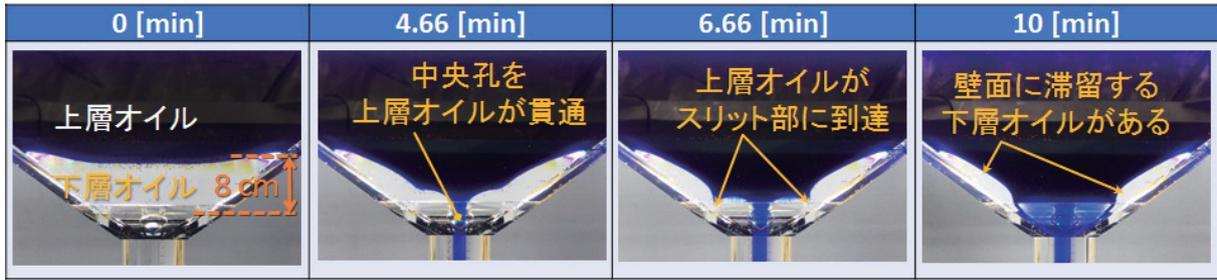


図 3.4 四角錐炉底、ストレーナ形状 TVF2における流下時の様子

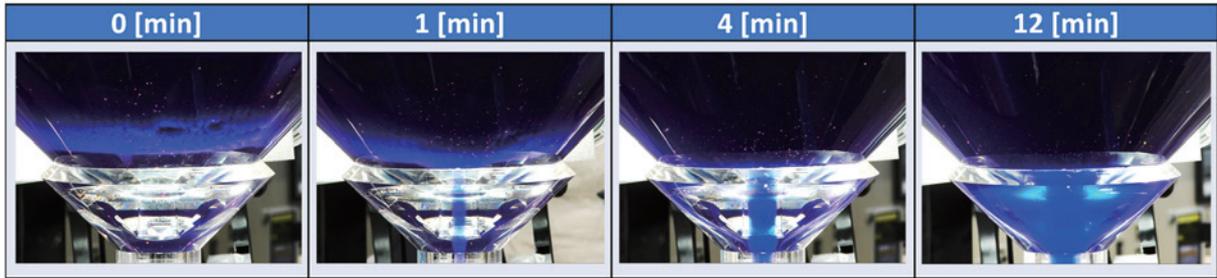


図 3.5 円錐炉底、ストレーナ形状 TVF3A における流下時の様子



図 3.6 円錐炉底、ストレーナ形状 TVF3D における流下時の様子

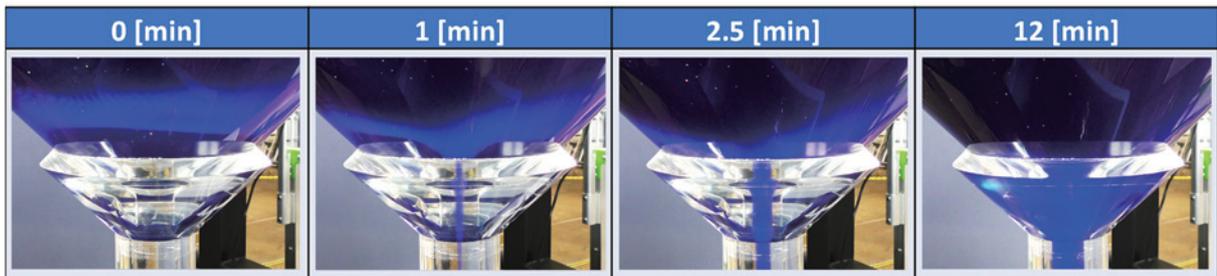


図 3.7 円錐炉底、ストレーナ形状 TVF3E における流下時の様子



図 3.8 円錐炉底、ストレーナ形状 TVF3F における流下時の様子

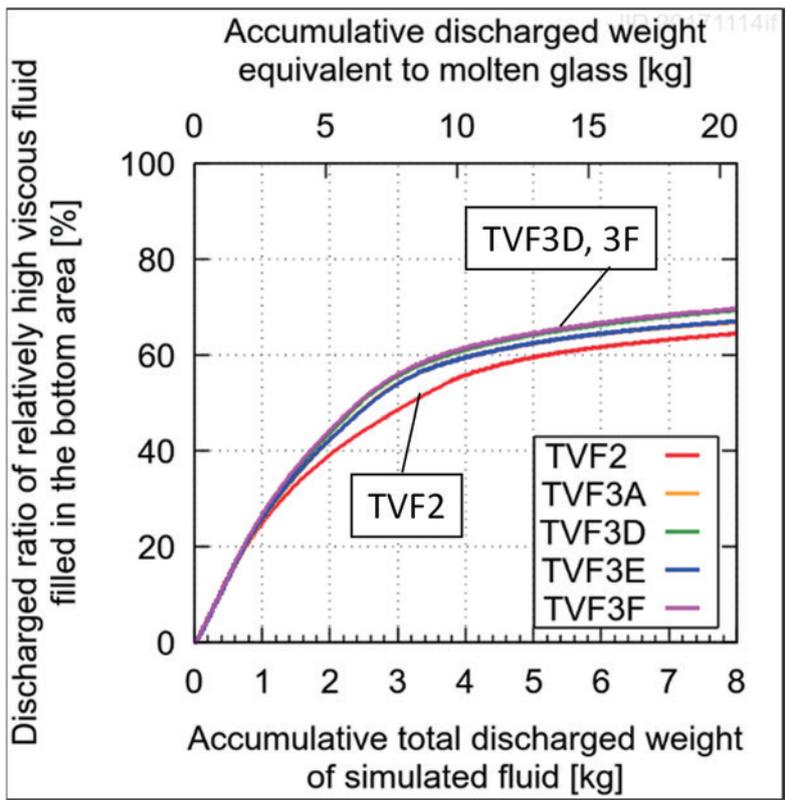


図 3.9 排出割合の時間推移

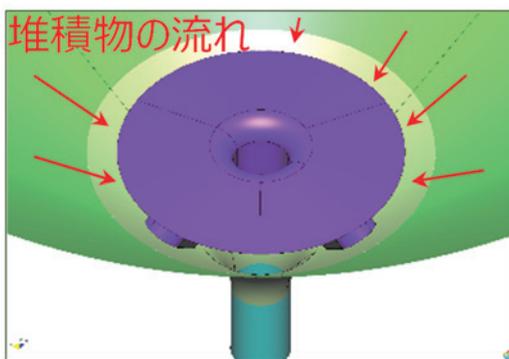


図 3.10 堆積物の流れの模式図

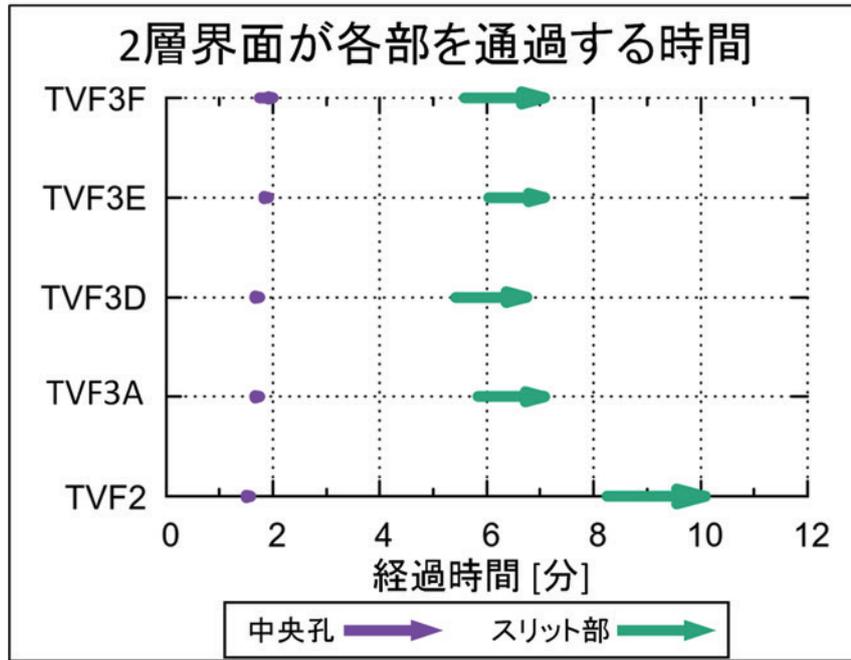


図 3.11 2層界面が各部を通過する時間

4 総括

本報では、次期溶融炉の炉底形状に関する検討として、技術的な課題の解決策や取り合いの成立性を確認した上で、研究開発に伴うリスクを負わず、改善効果を得られる蓋然性が高い改良を導入する方針で検討を進めた。

炉底形状については、現行炉と同じ四角錐形状に加え、傾斜角が45°と60°の円錐炉底を対象に、どの形状を次期溶融炉に採用するか検討を行った。技術的な観点からの検討では、いずれの形状も、炉底低温運転や炉底加熱運転を適用可能であることを熱流動計算から確認した。更に円錐炉底の場合は、炉底の温度分布が四角錐炉底に比べ均一で、炉底加熱時間が四角錐炉底の場合よりも短縮可能であることが分かった。これは白金族元素粒子の堆積抑制に効果が見込めるため、円錐炉底は現行炉と同等以上の運転操作性をもつと評価した。また、溶融炉の更新の際、モックアップ溶融炉を製作した上で廃液固化試験を行う必要が無く、かつ、既設設備との取り合いを成立させやすいという理由から、傾斜角が45°の円錐炉底が有利であると評価した。よって、次期溶融炉として傾斜角が45°の円錐炉底を採用した。

この円錐炉底に適合するストレーナ形状の調査では、底部電極に100Aを通電する炉底加熱運転を行うのに十分な電極表面積を持つことを前提に候補形状を設定し、炉底に滞留する比較的高い粘性をもつ流体の排出に有利な形状を調査した。その結果、ストレーナ形状は中央孔頂部の曲率半径10[mm]、外縁部の曲率半径5[mm]、流下ノズル付け根の曲率半径50[mm]の形状(TVF3D)を選定した。

謝辞

本検討のうち、アクリル模型を用いた流下実験を行うにあたり、検査開発株式会社の佐藤誠一様、株式会社 E&E テクノサービスの畠山清司様には、実験資材の準備や実験中のさまざまな作業において、協力やアドバイスをいただきました。この報告書をまとめるにあたり、ガラス固化技術課の正木敏夫様には、論法の妥当性や内容の正確さを高める指摘をいただきました。ここに記し感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構, ガラス固化処理計画の見直しの検討経緯と TVF の状況について, 第19回東海再処理施設等安全監視チーム (平成30年1月23日), <https://www.nsr.go.jp/data/000216499.pdf> (参照:2021年10月21日).
- 2) 吉岡正弘ほか, Private communication (1990).
- 3) 日本原子力研究開発機構, 石川島播磨重工業, 埼玉大学, 革新的実用原子力技術開発費補助事業 平成18年度成果報告書 長寿命ガラス固化溶融炉に関する技術開発, (2007).
- 4) Gordon S. Fulcher, Analysis of Recent Measurements of the Viscosity of Glasses, J. Am. Ceram. Soc., Vol.8, Issue 6, (1925), p.339.
- 5) 中島正義, 三浦昭彦, 堺公明, 塩月正雄, 川原仁志, 佐藤暁拓, ガラス固化溶融炉解析シミュレーションシステムの開発 (1) シミュレーションシステムにおける解析手法, 日本原子力学会2006年秋の大会, A04, 北海道大学 (2006).
- 6) 朝日良光, 中島正義, 菖蒲康夫, TVF2号溶融炉における厚みのある白金族体積形成を考慮した Lagrange シミュレーション, 日本原子力学会2015年秋の大会, E27, 静岡大学, (2015).
- 7) 河村和廣ほか, Private communication (1990).
- 8) 信越化学工業, 技術資料 シリコンオイル KF-96 性能試験結果, https://www.silicone.jp/catalog/pdf/kf96_j.pdf (参照:2021年10月21日).
- 9) 朝日良光, 中島正義, 菖蒲康夫, 厚みのある白金族元素の堆積形成を考慮した TVF ガラス溶融炉の運転シミュレーション, 日本原子力学会2016年春の年会, 1G13, 東北大学, (2016).
- 10) C. W. Hirt, A. A. Amsden, and J. L. Cook, An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds, J. Comp. Phys. Vol.14, No.3 (1974), pp.227-253.
- 11) GiD The personal pre and post processor, <https://www.gidhome.com/> (参照:2021年7月13日).
- 12) GiD The personal pre and post processor, GiD Reference manual, https://www.gidhome.com/archive/GiD_Documentation/Docs/GiD8/GiD8-UserManual.pdf.zip (参照:2022年1月17日).
- 13) 小林秀和ほか, Private communication (2017) .

付録 A アクリル模型を用いた流下実験

次期溶融炉の炉底候補形状において、ガラス流下時に渦などの圧損につながる流動場が生じないかを確認するため、アクリル模型にシリコンオイルを充填し流下する実験を行った。ここでは、その実験の詳細な方法を説明する。

A.1 使用設備

(1) 四角錐模型

図 A.1に示す四角錐模型は、TVF2号溶融炉の炉底部を実物大で再現しており、図 A.1(a)の画角からみて左右の斜面は水平面からの角度が45°、手前・奥の面が53°の四角錐形状である。本体は上から、(b)内圧を計測する差圧計、(c)炉底部、(d)ストレーナ、(e)流速制御に使用するボール弁、そして、流下重量を測定・記録する重量計とデータロガー（図 A.1(a)下部）で構成される。炉内における流動挙動が見やすいよう、溶融槽本体および天板部は無色透明なアクリル樹脂製である。

(2) 円錐模型

図 A.2に示す円錐模型は、傾斜が45°の円錐炉底形状を模擬しており、炉底の傾斜面とノズルの接続部は曲率半径 R50[mm]のベルマウス構造である。圧力計や重量計は(1)で説明したものと同様である。ストレーナ形状は表 A.1に示すように、ストレーナ中央孔頂部およびスリット外縁部における曲率半径が異なる組み合わせで4種類の形状を用意した。

A.2 実験条件

流下速度は、TVF2号溶融炉における典型的な流下初期の速度を設定した。TVF2号溶融炉での典型的な流下速度は、1バッチあたり約300[kg]流下するうち、はじめの100[kg]までは炉底付近の白金族元素堆積物が流下されるよう比較的低速な60~80[kg/h]、続く250[kg]までは110~180[kg/h]に制御している。本実験では前者の流速を適用した。溶融ガラスの密度は2500[kg/m³]⁷⁾、シリコンオイルの密度は970[kg/m³] (25[°C]) であるから、体積流量を同一にして流体をガラスからシリコンオイルに置き換えたとき、流下速度は24~32[kg/h]となる。

流下初期のガラス温度分布を表現するよう、粘性係数が異なる2種類のシリコンオイルを上下2層に充填した。実際の溶融炉におけるガラス温度分布を想定し、上層が20.0[Pa·s] (1050[°C]相当)、下層が5.69[Pa·s] (950[°C]相当) を目標に調合した。

A.3 試験手順

A.3.1 シリコンオイルの調合と粘性係数の確認

上層と下層に充填する模擬流体は、粘性係数が異なる2種類のシリコンオイル（原料1、原料2）を混合して作成した。混合されるシリコンオイルの粘性係数は、混合割合によって対数グラフ上で直線的に変化することが原料メーカーのカタログ⁸⁾からわかっており、混合割合は次の式で表せる。

$$r_1 = 1 - \frac{\log_{10}\eta_s - \log_{10}\eta_1}{\log_{10}\eta_2 - \log_{10}\eta_1} \quad (\text{A-1})$$

ここで、 r_1 は原料1の調合割合、 η_1 、 η_2 、 η_s は、それぞれ、原料1、原料2、目標の粘性係数であ

る。上層に充填されるものには、流下時の流れが見やすいよう着色剤を添加した。調合後にシリコーンオイルを一部採取し、平行平板型粘弾性測定装置を用いて、粘性係数が表 A.2の調合目標値に近いことを確認した。

A.3.2 シリコーンオイルのアクリル模型への充填

下層オイルをストレーナ上端から8[cm]上の高さまで充填し、一晚静置して脱泡した。下層オイル中に気泡が存在しないことを確認後、上層オイルを充填した。このとき、平板に細かい穴が多数空いた充填用フィルタをストレーナ上端から8[cm]上の高さに設置し、上下2層の界面が崩れないよう静かに注入した。その後、液面がストレーナ上端から9[cm]上に達したら充填用フィルタを持ち上げ、21[cm]まで充填した。シリコーンオイルの充填作業後、アクリル模型を蓋で密封し、気相部を水頭圧に相当する約4[kPa]で加圧した。

A.3.3 流下試験

流下ノズル先端のボール弁の開度を調整することで流下速度を実験条件の目標範囲に調整した。流下されるシリコーンオイルは、流下重量が所定量に達したとき断続的に採取した。ストレーナ近傍の流れの様子はビデオカメラで撮影した。

A.3.4 粘性係数測定

流下中に採取したサンプルは、均一になるよう混合した後に平行平板型粘弾性測定装置を用いて粘性係数を測定した。測定時にトルクが十分に得られることと、平行平板間からのシリコーンオイル漏出防止の観点から、測定条件は、せん断速度を5[s⁻¹]に固定し、60秒間に20点測定した。この20点を平均したものを一つの測定値とした。この測定を、装置に設置した試料を取り替えて、採取された同一のサンプルあたり3回繰り返した。こうして得られる3つの値から、最大値、平均値、最小値を算出した。

A.3.5 下層オイル排出割合の評価

流下中に採取される試料は、上層と下層に充填したシリコーンオイルが混ざり合ったものであるから、その粘性係数から下層オイルの含有割合を算出できる。2種類のシリコーンオイルの混合割合は、式(A-1)によって表すことができるので、下層オイルの含有割合 r_b は次の式で表求めた。

$$r_b = 1 - \frac{\log_{10}\eta_s - \log_{10}\eta_b}{\log_{10}\eta_t - \log_{10}\eta_b} \quad (\text{A-2})$$

ここで、 η_b 、 η_t 、 η_s は、それぞれ、下層、上層、サンプルの粘性係数である。あらかじめ下層に充填した重量 W_b を記録しておき、流下された流体の粘性係数を求めた上で、次の式を用いて累積の下層オイル排出割合 R_{dis} を算出した。

$$R_{dis} = \frac{1}{W_b} \int_0^{W_b} r_b dW \quad (\text{A-3})$$

ただし、サンプルは断続的に採取するので、採取されない流体は、その前後のサンプルの排出割合から直線補間し、(A-3)式中の積分は台形法による区分求積で近似した。

表 A.1 四角錐模型および円錐模型におけるストレーナ形状

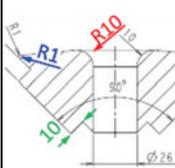
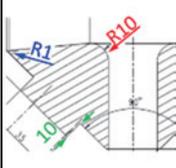
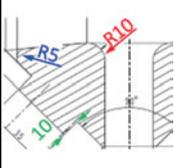
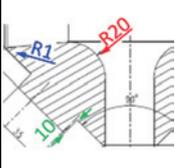
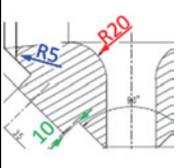
	TVF2	TVF3A'	TVF3D	TVF3E	TVF3F
溶融槽形状	45°四角錐	45°円錐			
ノズル付け根部曲率[mm]	R0	R50			
ストレーナ					
外縁部曲率[mm]	R1	R1	R5	R1	R5
中央孔頂部曲率[mm]	R10	R10	R10	R20	R20
中央孔下端部曲率[mm]	R1	R1	R1	R1	R1
中央孔内径[mm]	φ 26	φ 26	φ 26	φ 26	φ 26
スリット幅[mm]	10	10	10	10	10
上面の傾斜角	5.4°	5.4°	5.4°	5.4°	5.4°

表 A.2 原料および調合試料の25[°C]における粘性係数と動粘性係数

		粘性係数[Pa·s]	動粘性係数[mm ² /s]
原料	KF-96-1,000cs	0.97	1000
	KF-96H-10,000cs	9.72	10000
	KF-96H-100,000cs	97.4	100000
調合試料	950[°C]模擬流体	※20.0	※20536
	1050[°C]模擬流体	※5.69	※5857

※調合の目標値

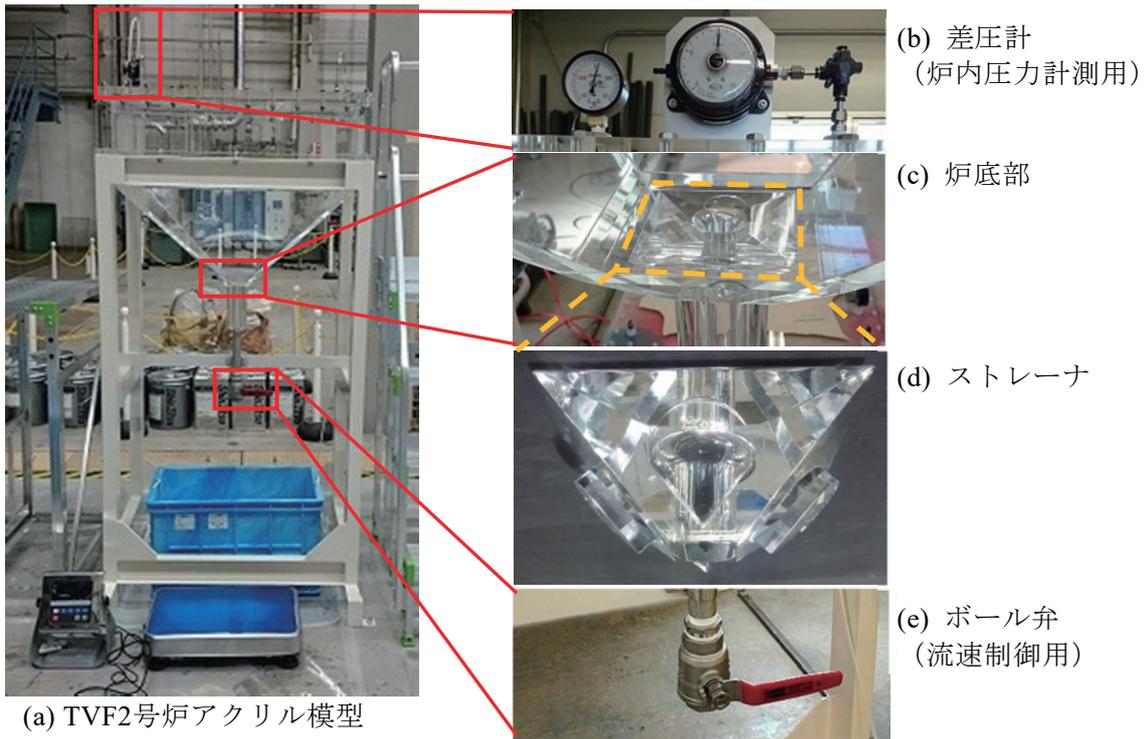


図 A.1 四角錐模型の外観

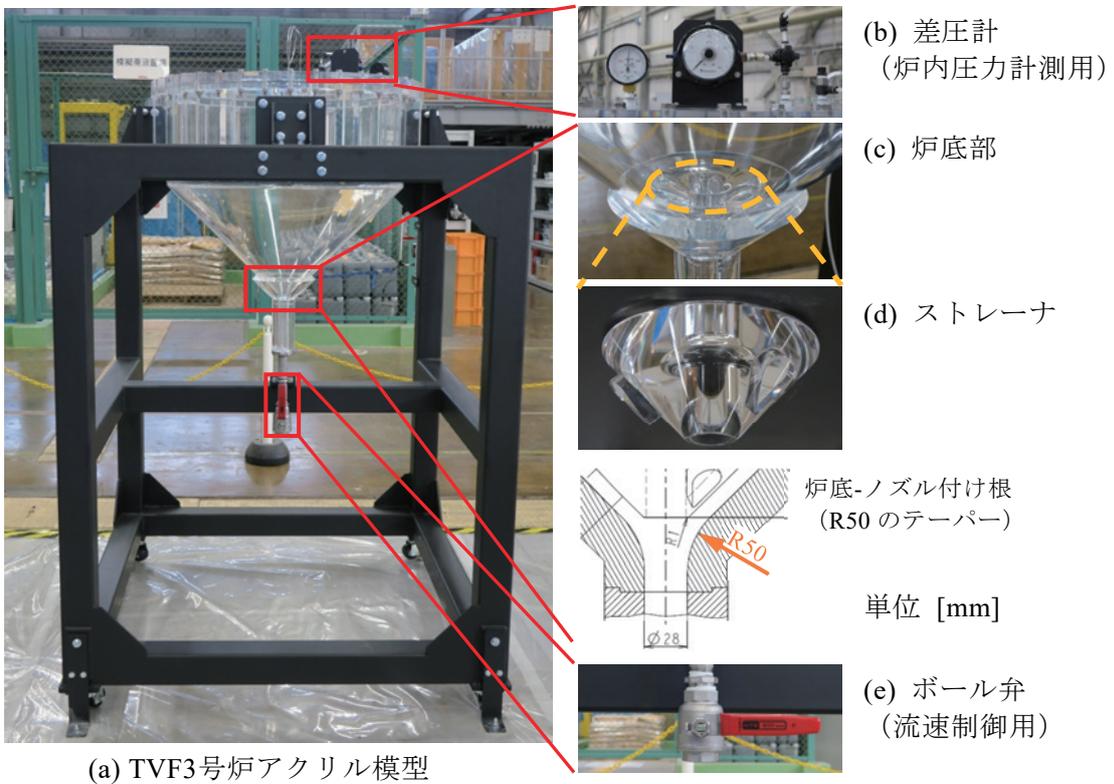


図 A.2 円錐模型の外観

付録 B 2層の粘性分布を持つ流体の流下シミュレーション手法

第3章で述べたストレーナ形状の選定にあたり、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics: CFD) による数値計算でシリコンオイルを流下する実験を模擬し、見積もられる種々の物理量や流動特性を、複数の炉底・ストレーナ形状どうしで比較した。ここでは、この計算手法や計算モデルを説明する。計算を行うにあたり用意した形状モデルについては、第 B.2節で説明する。熔融炉解析システムを用い、粘性係数が異なる2層のシリコンオイルの流動を計算するため導入した手法、特に2層の近似手法については、第 B.3節で説明する。計算によって得られる結果と実験結果を比較するために必要な計算結果の後処理については、第 B.4節で説明する。実験と計算との比較および考察を第 B.5節で説明する。

B.1 計算手法

計算には、FINAS/CFDTMを拡張し JAEA ガラス固化技術課が開発を進めてきたガラス固化熔融炉解析システムを用いた。これは、熱・流動・電場をオイラー系で解く CFD 計算コードと、流速場中の粒子の軌跡をラグランジアン系で解く粒子軌道追跡コードが連成された解析システムである^{5),9)}。

B.2 炉底・ストレーナの形状モデル

炉底・ストレーナ形状については、TVF2号熔融炉と同じ形状に加えて、円錐炉底形状に適合するストレーナとして4種類の計5種類を作成した。ストレーナ形状の型式名とそれぞれの各部の寸法を表 B.1に示す。以降では、ストレーナ形状を表に示した型式名で呼ぶこととする。解析対象の形状のモデリングと境界条件の設定、および、生成したメッシュについて以下で述べる。

B.2.1 TVF2号熔融炉モデル

TVF2号熔融炉アクリル模型のストレーナ形状モデルは、計算資源やメッシュを切る上で受ける幾何的な制約が許す範囲で、形状および寸法を設計図面に合わせて作成した。作成した形状モデルを図 B.1に示す。実物のストレーナの上面四隅につけられている R10[mm]の丸みは、形状モデルでは面取りで表現した (図中 e 部)。設計図面上では、ストレーナ上面にある中央孔周りの円 (図中 f 部) は、その外側の四角形 (図中 g 部) に内接している。しかし、円と四角形が内接する接点付近では、原理的に品質の良いメッシュが生成できないので、これを避けるため、四角形を実際の寸法から外側へ1[mm]拡幅した。ストレーナの上面外縁部には曲率半径 R1[mm]の丸みがつけられているが、本解析で用いるメッシュサイズは第 B.3.3項で述べる理由により最小サイズを1[mm]程度に制限しており、このメッシュサイズでは丸みを表現しきれないため無視した。すなわち、形状モデルでは外周部の曲率半径 R0[mm] (鋭利な角) としている。実物では脚部の下流側 (図中 h 部) につけられている R1[mm]の丸みも、ここでは R0[mm]としている。底部電極と流下ノズルとの接続部付近の形状モデルを図 B.2に示す。

流下ノズルは、実際の熔融炉と同じ長さのものに加え、直管部分を一部省略したモデルも用意した。これは、底部電極上端に相当する高さを $z=0$ [mm]の基準面として-130[mm]までをモデル化し、それより下の流下ノズル直管部分を省略したもので、形状モデルに含まれる流下ノズル直管部の長さは約68[mm]である。円管中の流速場が軸方向に一様とみなせるくらい十分発達するのに要する距離 (助走距離) は、本計算条件の範囲では数ミリメートル程度であり、流下

ノズルを短縮してもストレーナ付近の流動には影響しない。

B.2.2 TVF3号溶融炉モデル

TVF3号溶融炉アクリル模型の炉底・ストレーナ形状モデルも、TVF2号溶融炉モデルと同様に、寸法をアクリル模型の設計図面に合わせて作成した。底部電極位置に相当する流下ノズル取り付け部付近の形状モデル外観を図 B.3に示した。円錐炉底の傾斜面から流下ノズルにかけて設けられた曲率半径 R50[mm]のベルマウスや、涙滴型のストレーナ脚部断面も形状モデルへ反映した。各形状のストレーナ部分を抜粋したものを図 B.4に示す。ストレーナの外縁部や鼎脚一つひとつの下流側につけられている曲率半径が R1[mm]以下の構造については、最小メッシュサイズの制約のため R0[mm]（鋭利な角）へと合理化している。作成したストレーナ形状モデルの外観は、図 B.5が TVF3A、図 B.6が TVF3D、図 B.7が TVF3E、図 B.8が TVF3F にそれぞれ対応している。

流下ノズルは、底部電極上端に相当する高さを $z=0$ [mm]の基準面として-130[mm]までをモデル化し、それより下の流下ノズル直管部分を省略したのもも作成した。この場合、形状モデルに含まれる直管部分の長さは約42[mm]となるが、これは解析対象の条件における助走距離に比べて十分に長く、流下ノズルを短縮してもストレーナ付近の流動には影響しない。これに加えて、TVF3A および TVF3E については、流下ノズルの直管部がアクリル模型と同じ長さのものを用意した。

B.2.3 境界条件

(1) 流下速度

速度境界条件として、ストレーナや溶融槽、流下ノズルといった、固体壁との接触面に相当する面には滑りなし（non-slip）条件を与えた（図 B.9緑色の面）。流下ノズル下端の出口に相当する面には質量流量の速度境界条件（すなわち流下速度）を設定した（図 B.9青色の面）。この断面を通過する流体の質量流量は時系列で任意の流速を規定することができる。実験ではボール弁の開度を調整し、流下速度が溶融炉の流下速度に合うよう調整したが、その場合には、実験に合わせた流下速度を規定した計算も行った。ただし、計算の最初の10秒間は0[kg/h]に保つことによって、流下開始時点における静水圧平衡状態を計算で再現することとした。

(2) 液位変動と水頭圧

実験で用いられるアクリル模型は、炉底の傾斜部から流下ノズルにかけてのみが用意されており、実際の定常流下の場合に比べて液位は低いため、水頭圧は圧縮空気を用いて気相の圧力を調整することで模擬した。CFD 計算では、流下開始前の時点で液位をストレーナ上面から上に624[mm]の高さに設定し、流下に伴う液位低下は Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 法¹⁰⁾を用いて計算した。圧力境界としては、液面に0[Pa]の境界条件（図 B.10緑色の面）を設定した。ストレーナの直径は約130[mm]またはそれ以下であり、ストレーナから液面まではストレーナの直径の4倍程度離れているので、液面がストレーナ付近の流動へ及ぼす影響は無視できると考えられる。

B.2.4 メッシュサイズの妥当性確認

メッシュの要素サイズについては、溶融炉解析システムを用いた過去の数値解析経験から、四面体要素の非構造格子で溶融ガラスを計算する場合には、各要素の外接球半径が数ミリメートル程度以下とする必要性が分かっており、ストレーナ付近のメッシュを生成するときはこれ

を考慮してサイズを決めた。メッシュは GiD (Ver.8.0.9)¹¹⁾に付属のアルゴリズムで自動生成させており、そのときの設定パラメータは表 B.3の通りである。メッシュの要素数や最小体積、形状品質¹²⁾の最低値などの特性を表 B.1と表 B.2に示した。これまでの数値解析から、経験的に、形状品質の最小値が0.1を上回っていれば反復計算の解が収束しやすいことが分かっており、いずれの形状モデルもそれをなるべく満たすように各部のメッシュサイズを調整した。

生成されたメッシュが流れを表現するのに十分な細かさを持っているか確認するため、数値計算で得られる数値解と解析的に得られる厳密解とで流速場を比較する。計算条件は表 B.4に示すとおりである。流下ノズルは円断面の直管であり、レイノルズ数は次のようにして求められ、層流であることが分かる。

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu} = \frac{4 V_{out}}{\pi \eta d} \approx 0.036$$

d : 直管部の円断面内径 (28[mm])

v : 管内平均流速 (B-4)

η : 流体の粘性係数 (9.71[Pa·s])

ρ : 流体の密度 (970[kg/m³])

V_{out} : 流下速度 (28[kg/h])

なお、助走距離 L_e は Boussinesq と Nikuradse による半実験半理論式から

$$L_e = 0.06 Re \cdot d \approx 0.06[\text{mm}] \quad (\text{B-5})$$

となる。流れる液体が一様なニュートン流体であるとき、内部の流れは Hagen-Poiseuille 流れとなり、これは厳密解が得られている。すなわち、

$$u(r) = -\frac{1}{4\eta} \frac{dp}{dz} (R^2 - r^2) \equiv v_{max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (\text{B-6})$$

である。ここで、 R は流下ノズルの内半径である。管内平均流速 v は上の式を流路断面で積分することで

$$v = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{dp}{dz} = \frac{v_{max}}{2} \quad (\text{B-7})$$

と得られる。流下速度 V_{out} を28[kg/h]とすると、平均流速は $v = 4V_{out}/\pi\rho d^2 \approx 13[\text{mm/s}]$ であるから、解析的に予測される最大流速 v_{max} は26[mm/s]となる。これと同等の計算を CFD 計算で行った。以下で、CFD 計算による流速場の数値解と厳密解とを比較する。

(1) せん断速度分布

四角錐炉底で流下ノズルの長さを実物通りとした形状モデルを用い計算した、流速とせん断速度の計算結果を図 B.11(a)および(b)に示す。ここでは、炉底の谷に沿った断面（対角断面）のストレーナ付近を示した。また、円錐炉底で流下ノズルの長さを実物通りとした、ストレーナ形状が TVF3A の形状モデルによる計算結果を、図 B.12(a)および(b)に示す。いずれの計算結果も、固体壁近傍ではせん断速度が大きく、壁から離れた場所では小さくなっており、境界層が形成されていることが確認できる。

(2) 流速プロファイル

流下ノズル内部の流速分布を数値解と厳密解とで比較した結果を図 B.13に示す。数値計算の結果は、いずれも底部電極上端から-110[mm]の高さにおける x 軸に沿った流速 $|v_z|$ の分布で、流下ノズル内の十分に発達した流速プロファイルを表している。流速分布とその絶対値が、解

析的に予測される放物線状のプロファイルとよく一致している。図 B.14は、底部電極上端から-30[mm]の高さにおける x 軸に沿った流速 v_z/v_z^{Max} の分布を示しており、内径26[mm]のストレーナ中央孔における十分に発達した流速プロファイルが確認できる。なお、この位置の流れはスリット部を通る経路と並列であり、両経路の圧力損失はストレーナ形状によって異なるので、厳密な流速が求められないことから、各計算結果とも最大値 v_z^{Max} で規格化している。いずれも、厳密解から予想される通り、放物線状の流速プロファイルが得られている。

以上の結果から、メッシュサイズは計算体系を表現するのに十分な細かさを持っていることが確認できた。

B.3 2層に別れた流体の近似手法

実験において、溶融ガラスの代わりに充填・流下されるシリコンオイルは粘性係数が異なる2種類の液を用い、上下2層に分けて充填することで溶融ガラスの粘性分布が模擬される。粘性係数が異なる2層の流体を計算上で表現するためには、粘性分布を表現する手法が必要となる。今回の流下実験で用いるシリコンオイルは、スラリーとは異なり、流体を構成する分子自体の構造（重合度）が流体の粘性を決めている。この場合、白金族元素粒子を含有する溶融ガラスで生じるような粒子の沈降による粘性の高まりは生じない。この性質を模擬する近似手法を以下に説明する。

B.3.1 流体の粘性係数

上下2層に別れた流体のうち、下層に相当する流体領域にトレーサーとして擬似的な粒子を多数配置した。流体の粘性係数は粒子濃度の関数として規定し、流動場と粒子軌道を連成して計算した。

粘性係数が異なる二種類のシリコンオイルを混合した場合、粘性係数の対数は混合比率に比例することが、これまでの測定や原料メーカーのカタログ⁸⁾により確認されている。そこで、上層に充填される粒子を含まないシリコンオイルの動粘度を ν_u とおき、粒子濃度 c_p と動粘度 ν の関係を

$$\log_{10} \nu = \log_{10} \nu_u + c_p \quad (\text{B-8})$$

と定めた。また、温度 t [°C]のときの動粘度 ν^t [mm²/s]は原料メーカーのカタログ⁸⁾から

$$\log_{10} \nu^t = \frac{763.1}{273+t} - 2.559 + \log_{10} \nu^{25^\circ\text{C}} \quad (-25[^\circ\text{C}] \leq t \leq 250[^\circ\text{C}]) \quad (\text{B-9})$$

となるので、上層の動粘度 ν_u に温度依存性を加味するよう、(B-9)式の ν^t を(B-8)式の ν_u へ代入すれば、動粘度を温度と粒子濃度の関数として表すことができる；

$$\log_{10} \nu(t, c_p) = \frac{763.1}{273+t} - 2.559 + \log_{10} \nu_u^{25^\circ\text{C}} + c_p \quad (\text{B-10})$$

なお、シリコンオイルはせん断速度によらず動粘度が一定値をとるニュートン流体と仮定した。実際には、せん断速度が 10^3 [1/s]程度以上で見かけ動粘度が低下する非ニュートン性があるが、今回の解析対象の範囲では非ニュートン性は無視できることが図 B.11 (b)、図 B.12 (b)の計算結果から分かる。また、シリコンオイルの分子の重合度が異なる（すなわち、粘度が異なる）と密度も異なるが、解析対象の体系において、そのちがいは密度の絶対値に対して1%以下と小さいので無視し、この作業を通じて流体の密度 ρ_f に 970 [kg/m³]の一定値を用いた。粘性係数 η と動粘度 ν の間には $\eta = \rho_f \nu$ の関係があるので、式(B-10)は

$$\log_{10} \eta(t, c_p) = \frac{763.1}{273 + t} - 2.559 + \log_{10} \eta_u^{25^\circ\text{C}} + c_p \quad (\text{B-11})$$

と変形できる。

式(B-11)中の c_p は単位が無次元の量であるが、計算コードへ値を入力するときは[wt%]とみなした。上の式は粒子濃度が1[wt%]増加するごとに粘性係数が10倍になる関数であり、これは、粘度が異なる2種類のシリコンオイルを混合したときの、混合比と粘性係数が指数関数の関係となることを再現している。また、解析対象の実験では下層よりも上層に充填される液体の量が多いので、式(B-11)は、計算すべきトレーサー粒子の数を節約できるよう、上層の粒子濃度を0[wt%]と規定できるようになっている。 η_u の値を入力パラメータとして規定しさえすれば、 η_u よりも小さな粘性は表現できない代わりに、下層だけに有限の濃度を設定して上層の粒子濃度を0[wt%]とすることができる。例えば、温度25[°C]において、上層を7[Pa·s]、下層を20[Pa·s]とする場合、

$$c_p = \log_{10} 20 - \log_{10} 7 \approx 0.456 \quad (\text{B-12})$$

であるから、計算コードへ与えるパラメータ η_u に7[Pa·s]を設定した上で、下層に粒子濃度が0.456[wt%]となるように擬似粒子を配置すればよい。

B.3.2 擬似粒子の運動方程式

粒子挙動解析コードには、重力・浮力と流体抗力を考慮することができる運動方程式

$$\frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \mathbf{g} - C_D \left(\frac{3\rho_f}{4\rho_p D_p} \right) |\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_f| (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_f) \quad (\text{B-13})$$

が導入されている⁶⁾。ここで、 \mathbf{v}_p は粒子速度、 \mathbf{v}_f は流速、 ρ_p は粒子密度、 ρ_f は流体の密度である。 D_p は流体力学的等価直径を意味し、ある粒子が受ける抗力が、直径 D_p の球体受ける抗力と等価であるとして定義される。計算される擬似粒子は流線に沿って輸送されるとして、式(B-13)の右辺第2項を無視し、流体抗力のみで運動するとした。これは、 $\rho_p \approx \rho_f$ とおき、かつ、 D_p を非常に小さい大きさ： 1×10^{-10} [mm]とおくことで近似した。Stokesの式から得られる粒子沈降の終端速度は $\mathbf{v}_t = D_p^2 (\rho_p - \rho_f) \mathbf{g} / 18\eta$ であるから、粒子レイノルズ数 Re_p は任意の粘性係数 η 、任意の密度 ρ_f に対して

$$Re_p = \frac{\rho_f D_p |\mathbf{v}_t|}{\eta} \gtrsim 0 \quad (\text{B-14})$$

となる。なお、今回の計算では粒子から流体への反力は考慮していない。

今回計算される粒子は流体のトレーサーとして追跡される擬似粒子であるから、壁面に衝突しても反跳せず、壁に沿って平行方向に速度の向きを変える「壁面滑りモデル」⁶⁾を適用した。

B.3.3 粒子の初期配置と濃度計算手法

擬似粒子の初期状態での配置は、下層が充填される領域に一様ランダムに分布するよう、擬似乱数を用いた。ただし、大域的に一様な粒子配置であっても、メッシュ要素ひとつひとつの局所的なスケールでいえば、各要素の間には濃度のばらつきが生じる。サイズが1[mm]程度以下のメッシュ要素でも十分に濃度の一様性が保たれるほど多数の粒子を配置するのは、計算資源（時間、計算機のメモリなど）の制約から現実的ではない。このため、本計算では次に述べる3つの計算上の工夫を導入した。

第一に、メッシュは一つの要素サイズが1[mm]を下回らない大きさで生成し、それよりも小さな要素サイズでなければ表現できない構造は簡略化した。例えば、ストレーナには R1[mm]

の丸みが各部に設けられているが、この構造を計算用のメッシュで表現するには更に小さな要素サイズでメッシュ分割が必要となり、計算資源を多く消費する。そのため、現実的な時間内で完了でき、必要な計算精度を得られる程度の合理化策として、この丸みを鋭利な角として表現した。

第二に、ひとつひとつのメッシュ要素の粒子濃度を計算するときは、その要素に隣接する近隣のメッシュ要素も含めた平均の濃度とするよう粗視化した。ここでは、あるメッシュ要素の幾何学的重心から半径1.2[mm]の範囲に他のメッシュの幾何学的重心が含まれるとき、それらのメッシュに含まれている粒子の重量を合算し、同じく合算した要素の重量で除すことで得られる平均濃度をその要素の濃度とした。すなわち、メッシュ要素*i*の粒子濃度は、

$$c_{p,i} = \frac{\sum_k^{ER_i} N_k V_p \rho_p}{\sum_k^{ER_i} V_k \rho_f} \quad (\text{B-15})$$

と計算される。ここで、総和記号 $\sum_k^{ER_i}$ は、メッシュ要素*i*の重心からの半径*R*内に含まれるメッシュ要素に関する総和を意味し、 N_k は粒子数、 V_k はメッシュ要素の体積、 V_p は擬似粒子の体積を意味する。

第三に、粒子濃度が一樣であることを保証するため、上限濃度 c_p^{Max} を規定し、いずれかのメッシュ要素において上限濃度以上の濃度が見積もられたとき、その要素の濃度は上限濃度に等しいと見なした。すなわち、

$$c_p \leftarrow \begin{cases} c_p & (c_p < c_p^{Max}) \\ c_p^{Max} & (c_p \geq c_p^{Max}) \end{cases} \quad (\text{B-16})$$

となる。なお、上の式中の記号「 \leftarrow 」は代入を意味する。

B.4 流下される流体の性状評価方法

実験と CFD 計算を比較するため、CFD 計算で見積もられる種々の物理量に適当な処理を施し、実験で観測できる量を見積った。その方法を次に述べる。

B.4.1 下層の排出割合

擬似粒子と流体はほとんど一緒に移動するので、初期状態で粒子を下層に一様分布させることで、粒子を下層の流体のトレーサーとして扱うことができる。下層の流体が流下される割合は、各時間ステップまでに流失する擬似粒子の数を累積で数え上げ、初期配置した総数で除すことで見積った。

B.4.2 流下された液の粘性係数

実験では、アクリル模型から流下されるシリコンオイルは上層と下層が混ざった状態で採取され、そのサンプル内の粘度が一樣になるよう十分に攪拌した上で粘性係数が測定される。この測定値と比較可能な計算値を算出するため、計算で流下される流体についても一樣に混合した場合の粘性係数を見積った。

CFD 計算の結果からは、流下ノズル下端の出口において流速 \mathbf{v} と粘性係数 η を求めることができるが、これらの物理量は出口の境界面内で分布を持っており、流下された流体を一樣に混合した場合の粘性係数 $\bar{\eta}$ を求めることは、ある時間ステップの間に流下される流体の体積で混合比を重み付けした平均を求めることに相当する。混合比は粘性係数の対数に比例するから、流下された流体を均一に混合した場合の粘性係数は次の式で表される。

$$\bar{\eta} = \frac{\int_S (\log_{10} \eta) \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS}{\int_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS} \quad (\text{B-17})$$

ここで、 S は流下ノズル出口の面積、 \mathbf{n} は面積要素 ΔS の法線ベクトルを意味する。実際の計算では、メッシュ分割された領域の要素ひとつひとつに対して離散的に解が得られるので、式(B-17)を適切に離散化して算出する。

B.5 計算例

ここでは、CFD 計算による結果の例を提示し、異なる形状のストレーナどうして流動の特徴を比較する上で CFD 計算が利用しやすい特性を有することを説明する。

B.5.1 解析対象

解析対象は円錐炉底のストレーナ候補形状 TVF3A とし、ストレーナ付近の流れに影響しない流下ノズル下部の直管部分を省略したメッシュを用いる。このメッシュが本計算の目的に沿った十分な品質を持つことは B.2.4に示したとおりである。

B.5.2 計算条件

円錐炉底形状の亚克力模型を用いたシリコンオイル流下実験で計画された条件¹³⁾と、実験における実際の条件、および、計算条件を表 B.5に示した。粘性係数や流下速度の計算条件は、実験における流下重量推移や粘性係数の実測値に基づき設定した。

(1) 上層と下層の粘度

流下初期における熔融ガラスの温度を、上層が1050[°C]、下層が950[°C]と想定した場合、TVFにおける固化ガラスの標準組成である P0798の動粘度は、上層が6000[mm²/s]、下層が20000[mm²/s]となる。亚克力模型は熔融槽下部から流下ノズルまでを実物大で製作しており、かつ、流下速度は熔融ガラス流下時の体積流量に合わせるため、レイノルズ数 $Re = vL/\nu$ を熔融炉内の流動に合わせるため、シリコンオイルの動粘度は熔融ガラスのそれを目標値に、2種類の粘度が異なるシリコンオイルを混合して調合した。調合後に回転粘度計を用いて測定した粘性係数を計算条件に用いた。

(2) 温度

シリコンオイルの温度は一様で25[°C]の一定値として計算した。

(3) 流下速度

TVF2号熔融炉の流下開始初期における低速流下の段階では、ガラスの流下速度が質量流速で60~80[kg/h]である。このときの体積流速を保ったまま流体をシリコンオイルへ置き換えたとき、流下速度は24~28[kg/h]¹³⁾となる。実験では、この流下速度を目標に流下ノズルに取り付けたバルブの開度を調整した。図 B.15に青い点で示したのは、10秒間隔で測定された流下重量から求めた流下速度である。流下中に一部を粘度計測用に採取したことで、計測重量に加算されなかったサンプル重量を、その採取時刻に流下されたものとして加算し、60秒間の移動平均で平坦化したものが図 B.15に赤い線で示したグラフである。計算には、この60秒間の移動平均値を流下速度として用いた。

(4) 2層界面の初期状態

初期状態における2層界面は、底部電極ボディ上端に相当する高さ位置から上に80[mm]の位置に水平に設定した。実際の実験では、2層界面は水平からやや傾いて凹凸があったが、解析

では水平とした。また、液面は底部電極ボディの上端に相当する高さから上に649[mm]の位置に設定した。参考として、TVF2号溶融炉では、底部電極上端高さからLoレベル計電極の中心軸までの鉛直距離は約676[mm]、TVF3号溶融炉詳細設計では約672[mm]である。30分程度の流下中に約12~14[kg]のシリコンオイルが流下されると見込まれ、この間に計算上の液面は炉底の傾斜面より上にとどまるので、この計算は、ドレンアウトというよりもむしろ通常流下に近い状況を想定していることになる。

(5) 計算に特有の設定条件

時間ステップ、粒子数などは表 B.6に示した通りである。

B.5.3 計算結果と評価

図 B.16の①に実験の写真、②にストレーナ周辺の鉛直断面における粘性係数分布の計算結果を示す。上層に充填された青いシリコンオイルは、中央孔を貫通した後にスリット部を貫通しており、CFD解析と実験は定性的に整合している。

CFD計算では、初期状態における2層界面を計算のたびにほぼ理想的な水平面状に形成することが可能で、実験に比べて毎回の界面の状態をそろえることが容易である。この特性は、ストレーナ形状のちがいに起因する流動特性のちがいを比較する場合には有利である。式(A-2)や式(B-9)から分かるように、シリコンオイルの粘性係数は温度や調合割合に対して指数関数の関係があるため、実験する場合には条件のぶれを注意深く取り除く必要があるが、CFD計算では初期状態の粘性分布を数値誤差の範囲で合わせることが可能である。異なるストレーナ形状どうしのCFD解析において、流体の粘性係数や2層境界面を厳密に一致させた計算を行えば、ストレーナ形状の違いに起因する流動への影響を調査することができる。

表 B.1 アクリル製ストレーナ模型の各部の寸法、
および、流下ノズル短縮した形状モデルのメッシュの品質

形式名	TVF2	TVF3A	TVF3D	TVF3E	TVF3F
外縁部の曲率[mm]	R1 (R0) ¹	R1 (R0)	R5	R1 (R0)	R5
中央孔頂部の曲率[mm]	R10	R10	R10	R20	R20
中央孔下端の曲率[mm]	C0.2~0.5 (R0)	R1 (R0)	R1 (R0)	R1 (R0)	R1 (R0)
中央孔の内径[mm]	26	26	26	26	26
スリット幅[mm]	10	10	10	10	10
上面の傾斜角	5.4°	5.4°	5.4°	5.4°	5.4°
流下ノズル付け根の曲率[mm]	R0	R50	R50	R50	R50
メッシュ要素数[10 ⁴ 個]	32.9	35.2	41.7	33.0	36.2
メッシュ要素体積の最小[mm ³]	0.0876	0.0218	0.0444	0.0424	0.0228
形状品質 ² の最低値[1]	0.114	0.102	0.115	0.107	0.130
最小二面角の最小値	8.59°	5.17°	8.97°	6.50°	8.97°

表 B.2 アクリル製ストレーナ模型の各部の寸法、
および、流下ノズルの長さが実物どおりの形状モデルのメッシュの品質

形式名	TVF2	TVF3A	TVF3D	TVF3E	TVF3F
メッシュ要素数[10 ⁴ 個]	30.0	23.5	—	38.8	—
メッシュ要素体積の最小[mm ³]	0.12	0.00206	—	0.0267	—
形状品質 ³ の最低値[1]	0.0981	0.103	—	0.12	—
最小二面角の最小値	9.32°	12.4°	—	11.7°	—

¹ カッコ内の数値は、CFD 計算用に合理化してモデリングされたときの寸法を意味する。

² 四面体要素の形状品質 q は $q = 6\sqrt{2} V / \sum_{i=1}^6 l_i^3$ で見積もられる¹²⁾。ここで、 V は四面体の体積、 l_i は四面体の辺の長さである。 $q = 1$ が最も品質が高くなる正四面体で、値が小さいほど品質が低いことを意味する。

³ 四面体要素の形状品質 q は $q = 6\sqrt{2} V / \sum_{i=1}^6 l_i^3$ で見積もられる¹²⁾。ここで、 V は四面体の体積、 l_i は四面体の辺の長さである。 $q = 1$ が最も品質が高くなる正四面体で、値が小さいほど品質が低いことを意味する。

表 B.3 メッシュの生成手法・調整パラメータ

項目	設定値
面のメッシュ分割手法	RJump
サイズ自動補正	Hard
非構造格子サイズ遷移の速さ	0.3
平滑化	HighAngle

表 B.4 計算条件

計算条件の項目	設定値
使用する形状モデル	炉底・ストレーナ形状 TVF2、流下ノズル長さ短縮版
メッシュの要素数	表 B.1を参照
流動の想定	層流・非定常
AMG 法の不足緩和係数（速度場）	0.7
AMG 法の不足緩和係数（圧力）	0.2
1ステップあたりの収束反復回数	10[sweep]
CFD 計算の時間ステップ	1[s]
シリコーンオイルの粘性係数	9.71[Pa·s]（P0798換算温度1090[°C]） ¹
シリコーンオイルの密度	970[kg/m ³]
温度	25[°C]
流下速度（質量流速）	0~28[kg/h]

¹ P0798 換算温度とは、TVF 固化体の標準ガラス P0798 の粘性が表に示す粘性係数と同じになるときの温度を意味し、3 つの温度[°C]における粘性係数[Pa·s]の測定値を元に Fulcher の式に基づいて表した式(3-1)で換算したものである。

表 B.5 流下実験の計画と実測値、および、計算の条件

条件項目	計画 ¹⁾	実測	計算
上層			
P0798換算温度 ¹⁾	1050[°C]	1140[°C]	1140[°C]
粘度	動粘度：6000[mm ² /s]	動粘度：6.60[Pa·s]	粘性係数：6.60[Pa·s]
充填量	下層の上からストレーナの上220[mm]まで	←	
下層			
P0798換算温度	950[°C]	1000[°C]	1000[°C]
粘度	動粘度：20000[mm ² /s]	動粘度：25.2[Pa·s]	粘性係数：25.2[Pa·s]
充填量	底部電極上端相当高さから上80[mm]まで	←	←
その他			
温度	室温	室温	25[°C] (一定)
流下速度	24~28[kg/h] (ガラス換算で60~80[kg/h])	図 B.15の通り	図 B.15 (60秒間の移動平均)
界面の状態	水平面	傾きや数 cm 程度の凹凸がある	水平面

¹⁾ P0798 換算温度とは、TVF 固化体の標準ガラス P0798 の粘度が表に示す粘性係数と同じになるときの温度を意味し、3 つの温度 (950、1000、1050[°C]) における粘性係数[Pa·s]の測定値を元に Fulcher の式に基づいて表した式(3-1)で換算したものである。

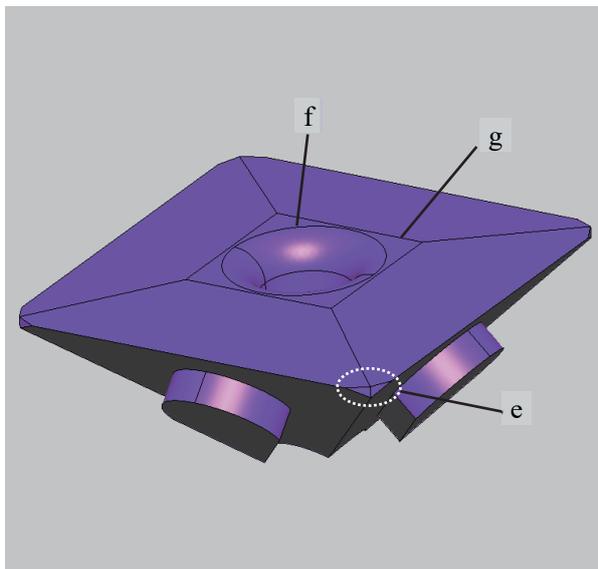
表 B.6 計算条件

設定する項目	計算条件
使用する形状モデル	流下ノズル長さ短縮版
メッシュの要素数	35.2万
流動の想定	層流・非定常
AMG法の不足緩和係数（速度場）	0.7
AMG法の不足緩和係数（圧力）	0.2
1ステップあたりの収束反復回数	10[sweep]
CFD解析の時間ステップ	1[s]
粒子挙動解析の時間ステップ ¹	≤ 1[s]
粒子数	2000万個
粒子濃度の粗視化範囲 ²	1.2[mm]

¹ 粒子挙動解析では、陰的オイラー法による粒子軌道の時間積分間隔は、その場のメッシュサイズと速度の関係によっては、計算精度維持のため、自動的に1秒間よりも短く調整されることがある。粒子濃度分布の更新間隔は1秒間である。

² 第B.3.3項を参照のこと。

(a) 上面側



(b) 底面側

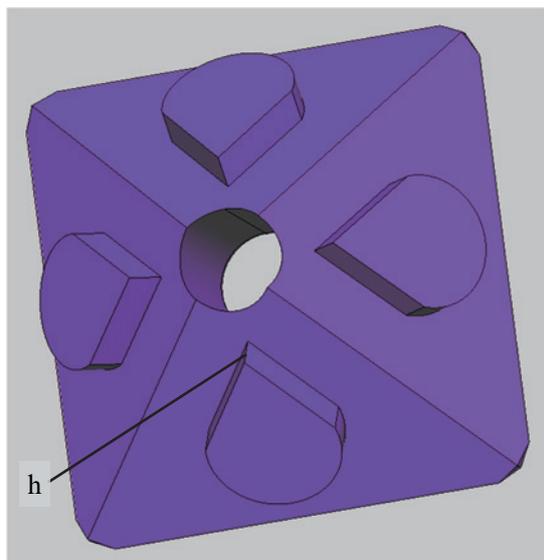


図 B.1 TVF2号熔融炉の解析用ストレーナ形状

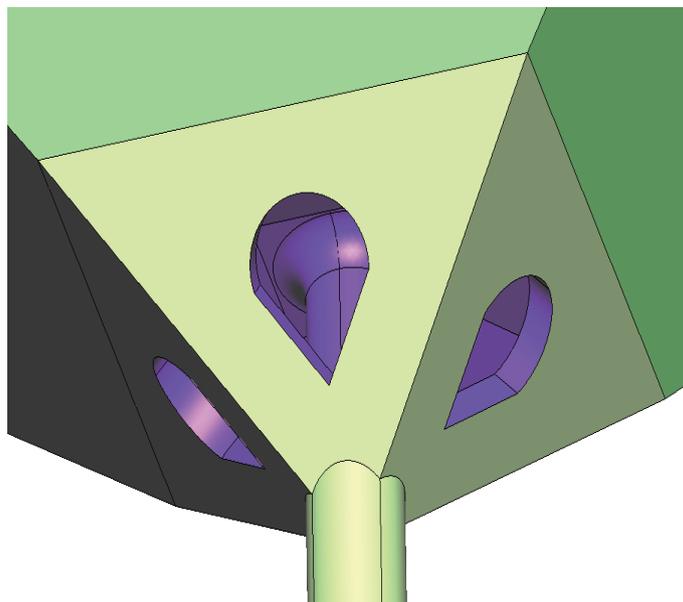


図 B.2 TVF2号溶融炉の底部電極と流下ノズルの接続部の形状モデル

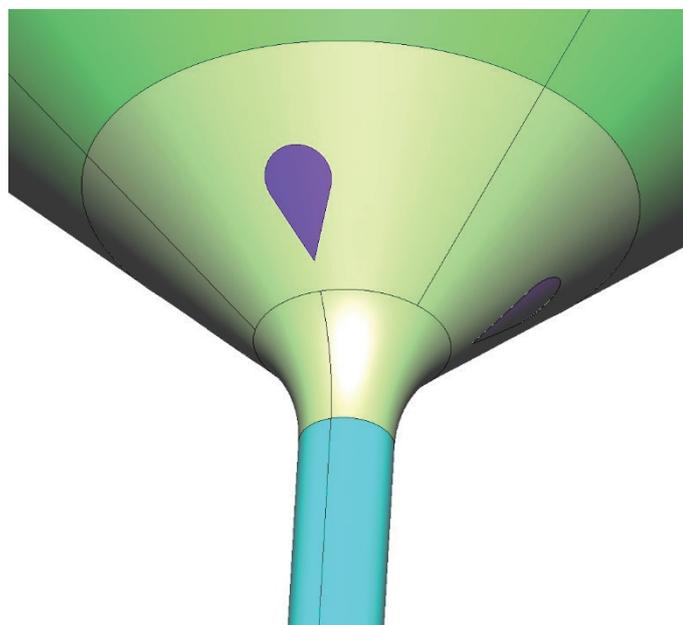
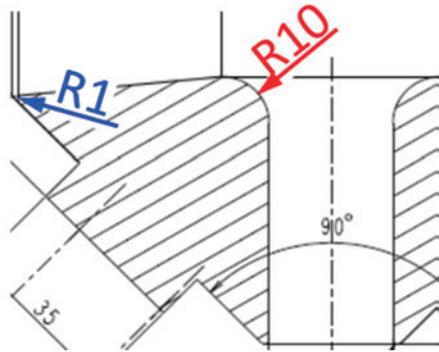
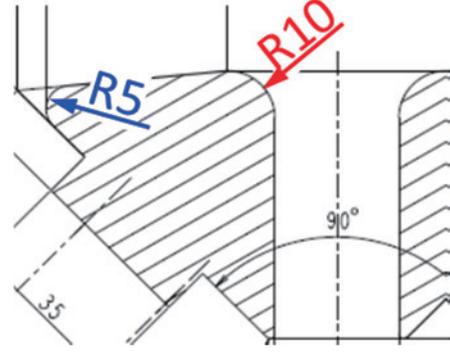


図 B.3 TVF3号溶融炉の底部電極と流下ノズルの接続部の形状モデル

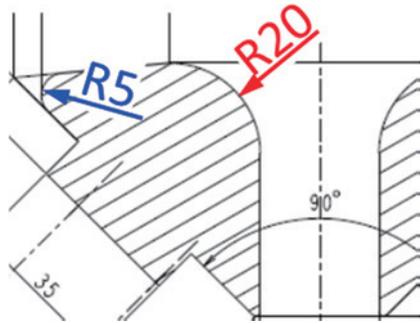
単位 [mm]



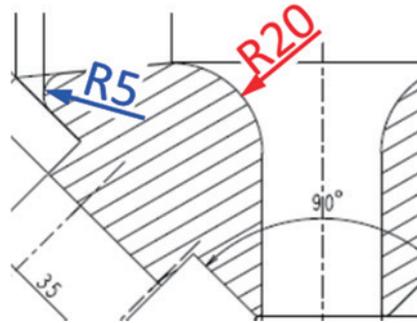
(a) ストレーナの亚克力模型 A



(b) ストレーナの亚克力模型 D



(c) ストレーナの亚克力模型 E



(d) ストレーナの亚克力模型 F

図 B.4 TVF3号溶融炉の亚克力模型試験用ストレーナ形状

(a) 上面側

(b) 底面側

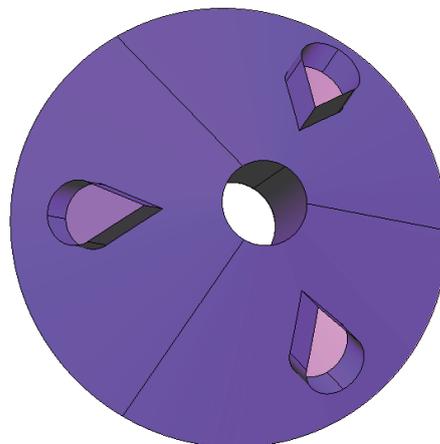
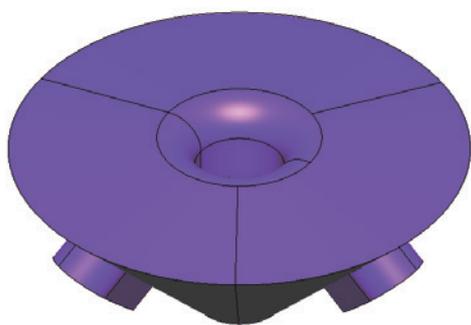


図 B.5 円錐炉底用ストレーナ候補形状 TVF3A の解析用形状モデル外観

(a) 上面側

(b) 底面側

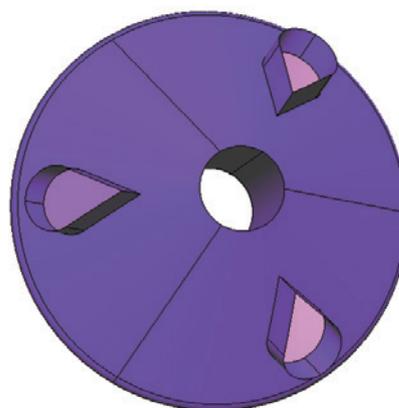
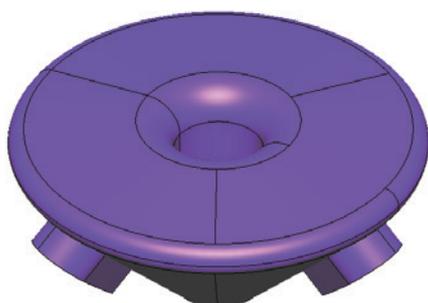
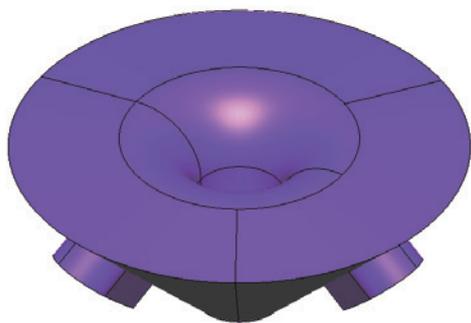


図 B.6 円錐炉底用ストレーナ候補形状 TVF3D の解析用形状モデル外観

(a) 上面側



(b) 底面側

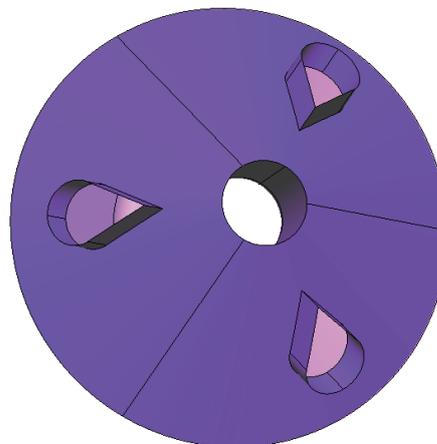
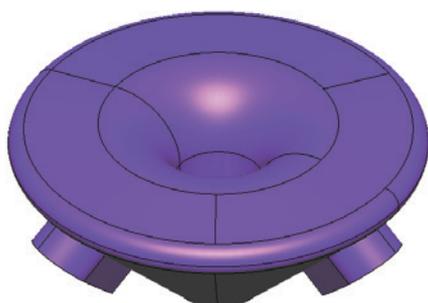


図 B.7 円錐炉底用ストレーナ候補形状 TVF3E の解析用形状モデル外観

(a) 上面側



(b) 底面側

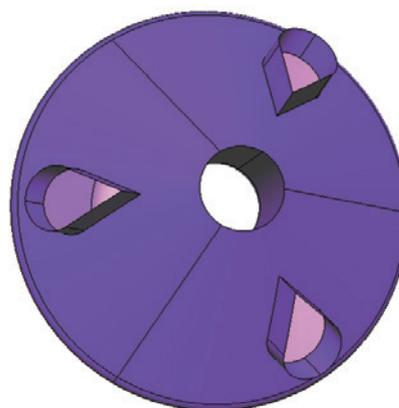
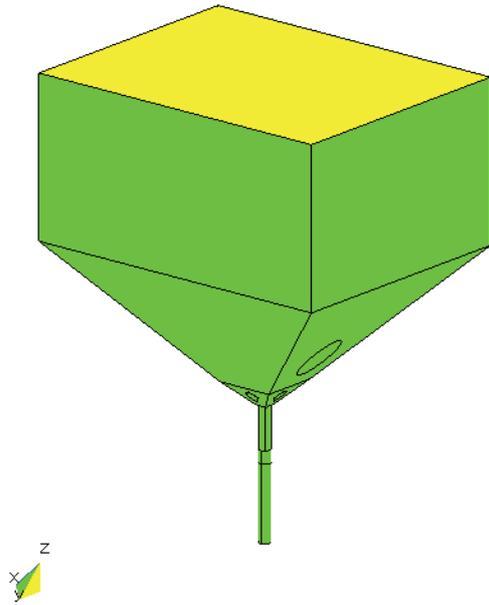


図 B.8 円錐炉底用ストレーナ候補形状 TVF3F の解析用形状モデル外観

(a) 上からの視野



(b) 下からの視野

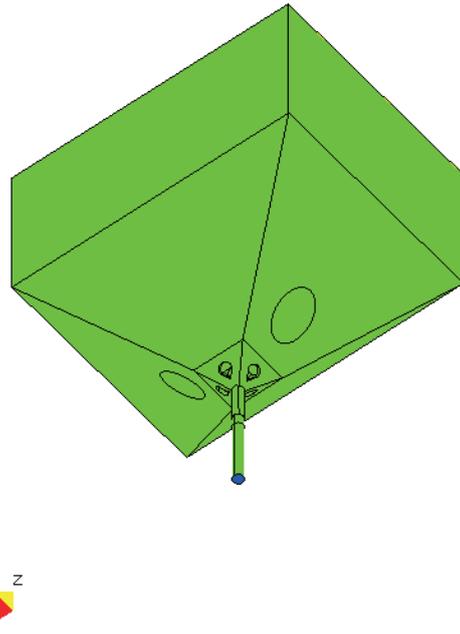


図 B.9 解析モデルの速度境界条件を設定した面

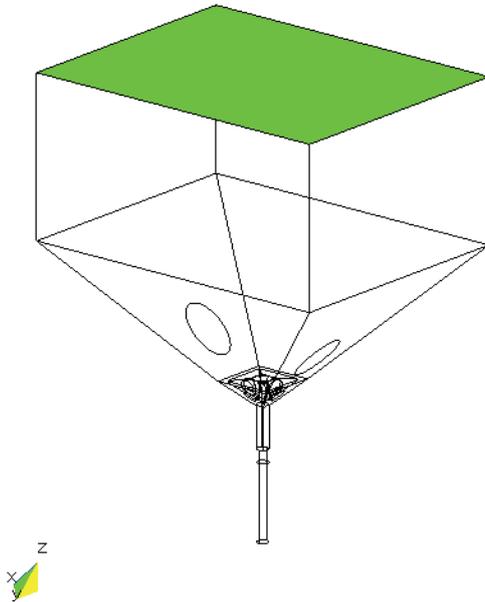


図 B.10 解析モデルの圧力境界条件を設定した面

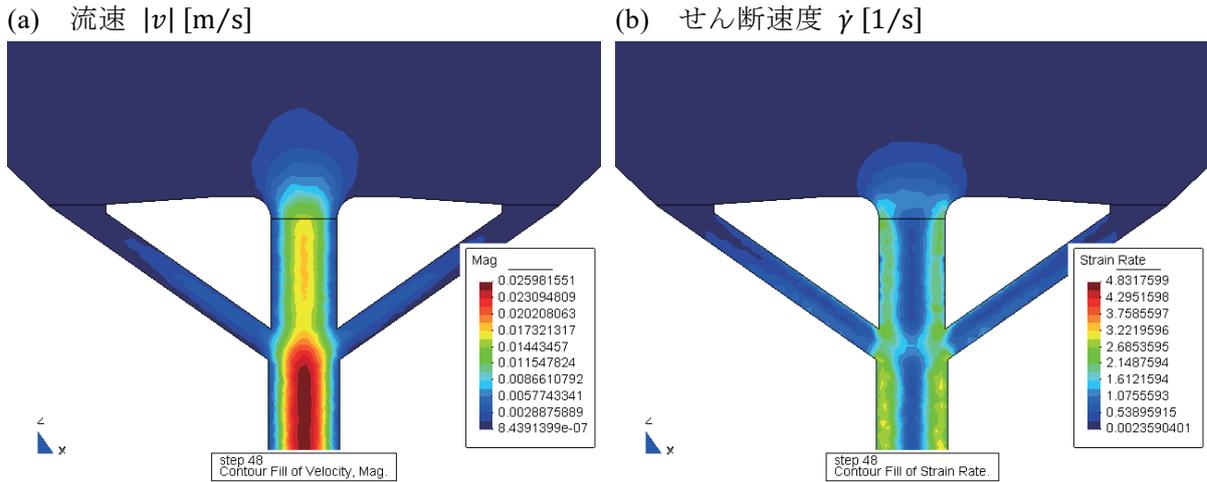


図 B.11 ストレーナ付近の谷部垂直断面における流速とせん断速度の計算結果

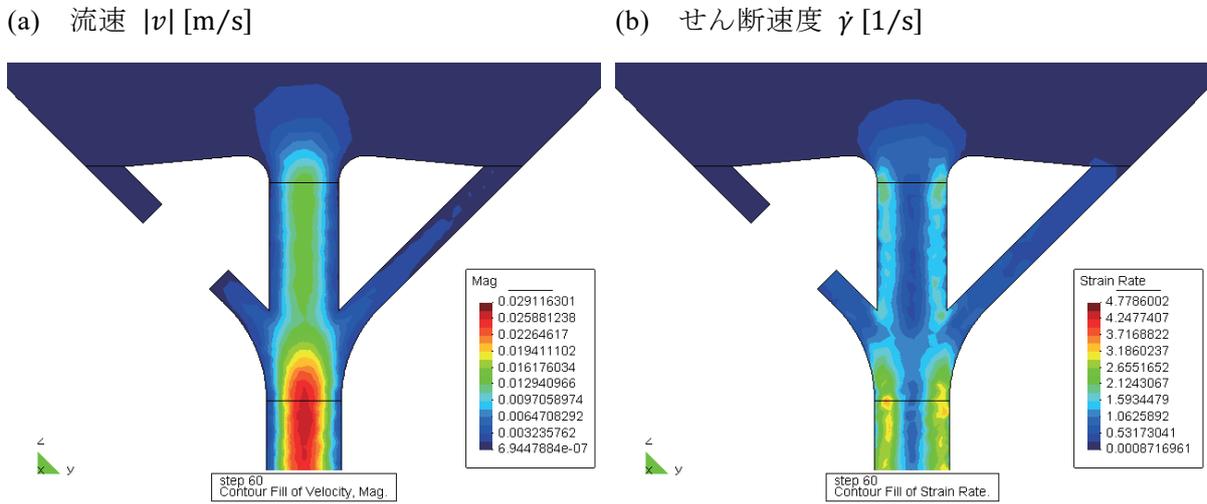


図 B.12 ストレーナ付近の垂直断面における流速とせん断速度の計算結果

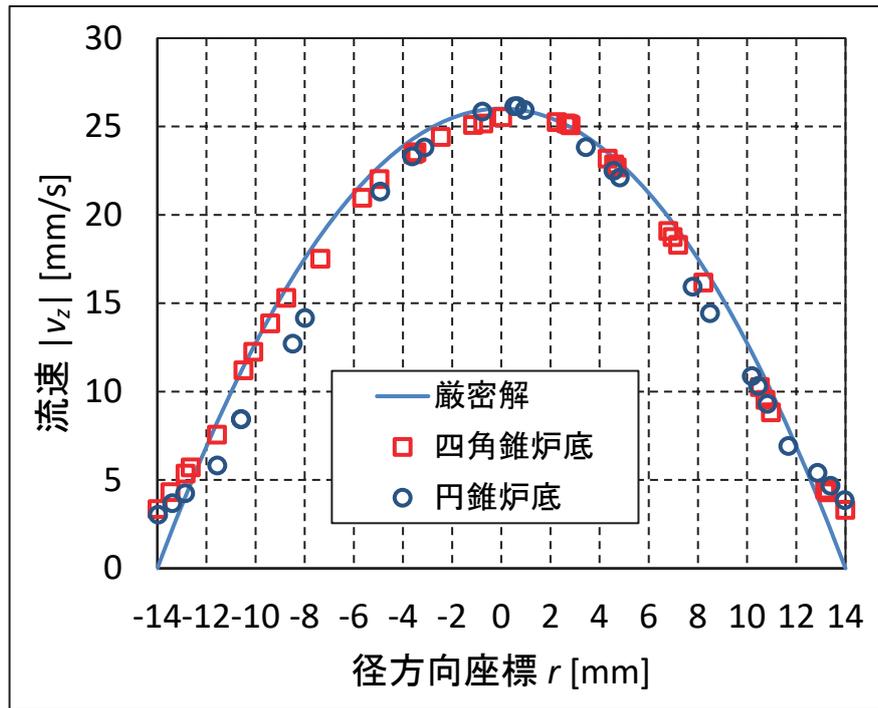


図 B.13 流下ノズルの水平断面における流速 v_z の径方向分布

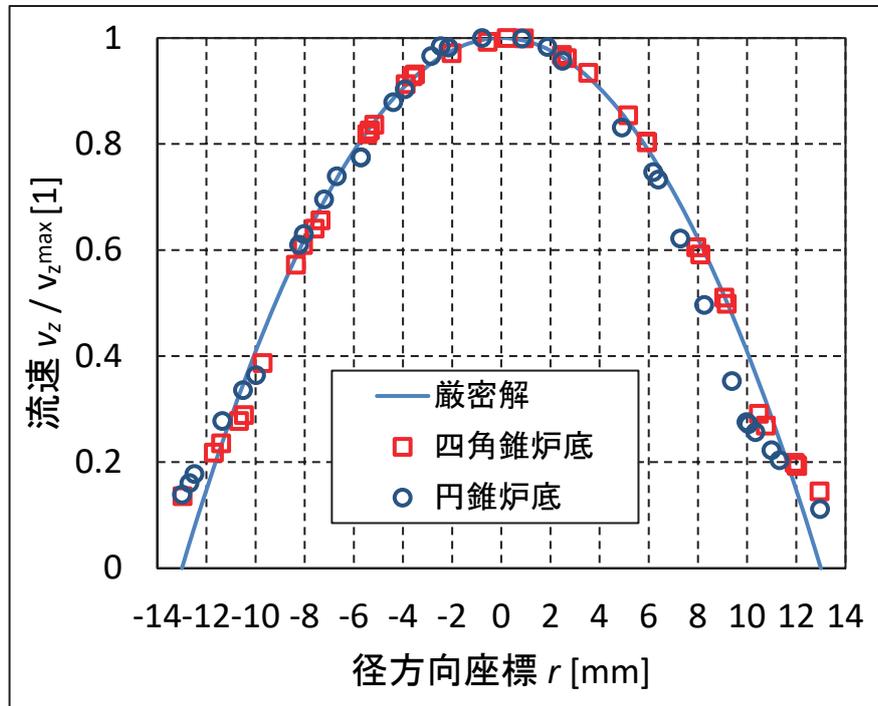


図 B.14 ストレーナ中央孔の水平断面における流速 v_z の径方向分布

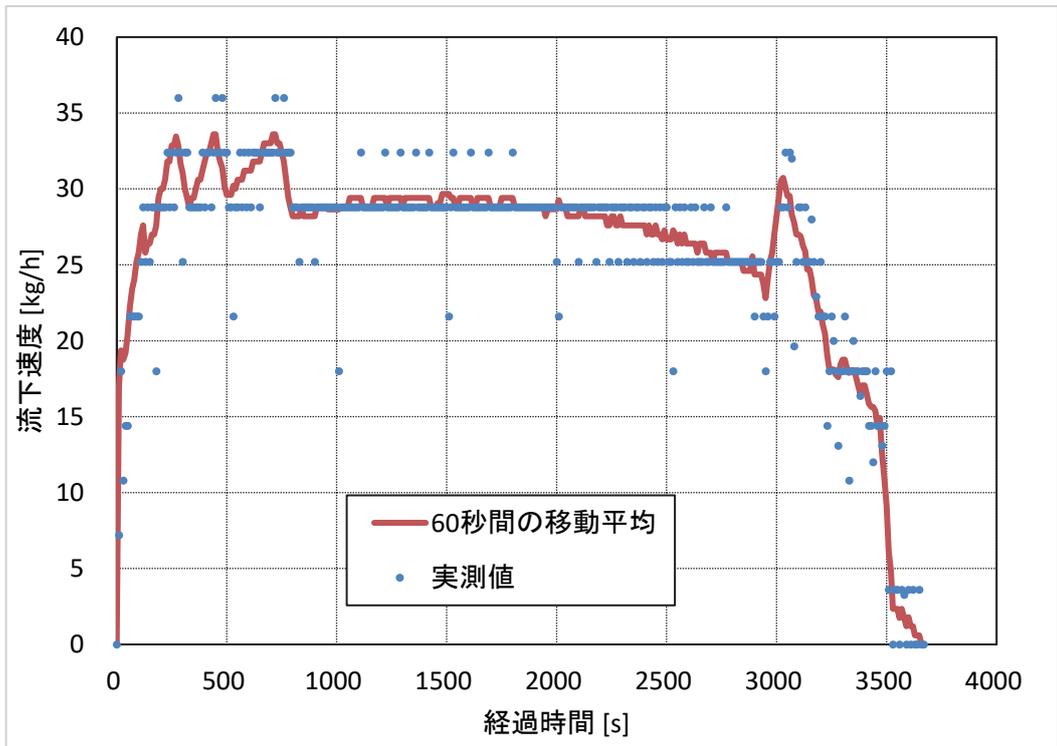


図 B.15 流下速度

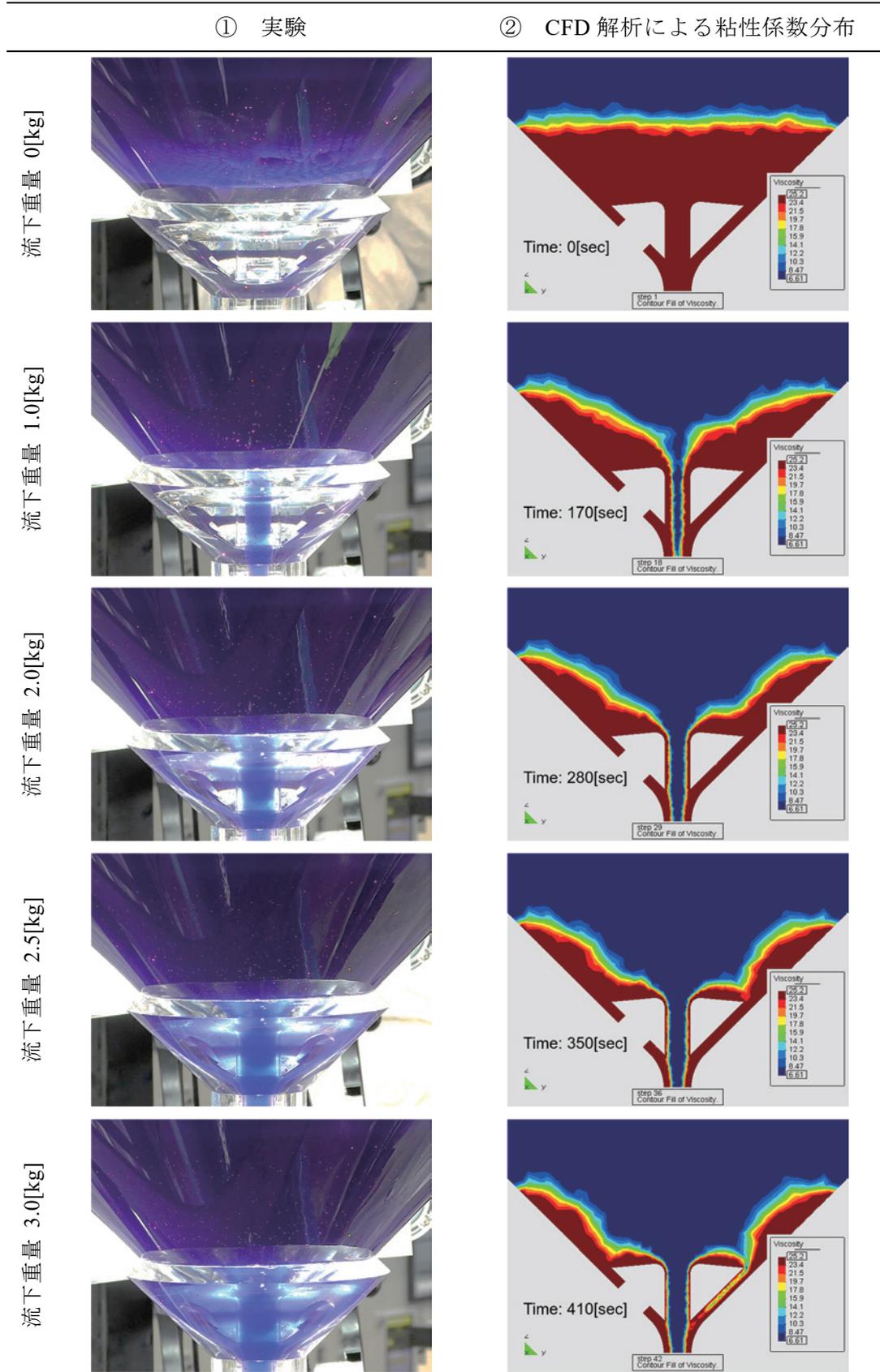


図 B.16 流下重量に対するストレーナ周辺の粘性分布

