いまさら聞けないガラス講座

ガラス熔融のシミュレーション技術

ガラス技術研究所

織田　健嗣

Simulation technology of glass melting

Kenji Oda

Institute of Glass Technology

はじめに

明治維新から150年を経たが，我国のガラス産業は，過去100年の間に欧米の技術を輸入し，独自の発展を遂げ，グローバルな地位を築いてきた。一方，熔融シミュレーション技術は，1970年前後からコンピュータの発達とともに進化し，約50年の歴史を持つ。ガラス槽窯の燃焼空間，熔融ガラス（素地「きじ」）空間と原料熔融の伝熱及び物質移動の連成モデルは，真瀬の研究[1)]が嚆矢である。その後，Vanandruelが非定常3次元有限要素法の素地流れモデルを開発し[2)]，今日，ガラス熔融のシミュレーション技術は，ガラス槽窯の設計，操作，トラブル解決の必須のツールとなっている。以下にシミュレーション技術の現状と課題を記す。

シミュレーション技術の現状と課題

“溶解”が溶質を溶媒に解かすことを指すのに対して，“熔解”は，原料を熱によって熔融し，同じ成分の融液と合せることを言う。原料がガラス製品になる過程には熔融，清澄，酸化還元の三つの化学反応がある。熔融は原料が固相から液相に変化するまでの反応であり，生成された粗熔融ガラスが槽窯内の素地に流下し，母ガラスと合わさり，清澄，酸化還元の反応を経て，成型されて製品となる。酸化還元の反応は非平衡で，反応時間は槽窯内の滞留時間に匹敵し，酸素の拡散速度が遅く，実質的に不可逆である。

これらの反応は未解明な点が多く，熔融シミュレーション技術は，発展途上にあると言える。一方，素地の熱対流シミュレーション技術によって，製品ガラスと同質の素地が素地空間に流入し，流出するまでの輸送現象を高精度で計算できるようになっている。

⑴原料の熔融反応

一部のガラス原料を除いて，熔融過程における物性値，放出ガス量，空隙率の変化，熔融反応が生じる温度や化学反応熱が測定されていない。普遍的な熔融シミュレーション技術を確立するためには，各種のガラス原料についての反応の研究が待たれる。

⑵素地の熱対流

素地の熱対流は，居住空間で冷たい窓辺から発生する下降冷気によって，室内に温度差が生

〒244-0801
神奈川県横浜市戸塚区品濃町553-1, J-1308
TEL　080-1308-7954
FAX　045-824-9318
E-mail: bach-ken@nifty.com

じる，コールドドラフトに類似している。槽窯内の素地表面は燃焼空間からの輻射熱を吸収し，温度が上昇し，表面の最高温度域（hot spot）と外側から冷却されている前後・左右の種瓦に接する素地との間に温度差（勾配）が生じる。この平面的な温度差によって平面的な密度差が生じ，素地の３次元的な熱対流が生じる，図１[3]。この熱対流の強度は粗熔融ガラスの流入量，温度や成型域への流出量（＝生産量）によって変化する。

空気や水のような流体は，粘度の温度依存性が小さく，熱伝導率が大きいほど，流体内部の温度差が小さくなり，密度差が小さくなり，対流が小さくなる。ところが素地は，熱伝導率が大きいと，燃焼空間から素地表面への伝熱量が増し，内部の素地温度が上昇し，素地の粘度が小さくなり，同じ温度勾配であっても熱対流が強くなる。

⑶素地中の化学反応

小規模試験で用いる坩堝と実槽窯で起きる現象の乖離は大きい。坩堝では原料が熔融し，完全に混合し，反応が平衡に達するのに対し，槽窯では素地の履歴が異なり，混合が不完全で，滞留時間が有限で，反応は非平衡のまま製品になる。したがって坩堝試験で製品素地の品質を定量的に予測することは困難である。特にガラス製品の主要な欠点は，気泡であり，その予測がシミュレーションに期待されてきた。

気泡の統計量の挙動[4]を調べれば，素地中の気泡数密度の分布を求めることは可能である，図２[5]。

清澄や酸化還元（redox）反応の研究に基づき，反応を伴う輸送現象の数学モデルは定式化され，清澄性や redox 状態を予測するシミュレーション技術を開発されている。清澄剤の濃度 C の実質微分 DC/Dt が，素地流れに沿う各点の濃度 C と温度 T から，反応の進度 τ を逆算して，反応速度 R（τ）から求められることに着目すれば，清澄剤の輸送現象はモデル化される。芒硝の熱分解反応における SO_3 濃度の分布を図３に例示する[5]。

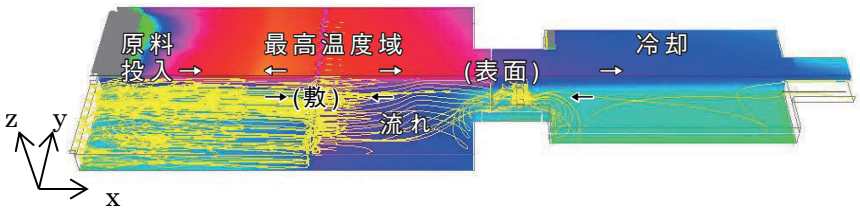

図１　フロートガラス槽窯内の３次元（長手 x ×幅 y ×深 z）熱対流

図２　素地中の log10 気泡数密度 N の２次元（長手・横×深さ・上下）分布，
凡例 log10N［pcs/cm^3］：Max. 5 ～min. − 5

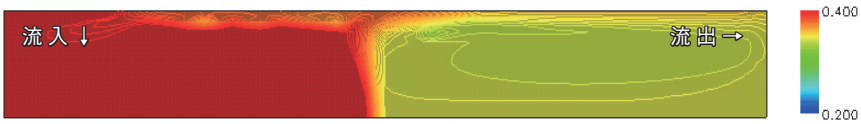

図３　素地中の SO_3 濃度の２次元（長手・横×深さ・上下）分布，
凡例 SO_3［wt%］：Max. 0.4 ～min. 0.2

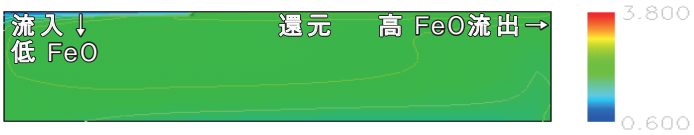

図４　槽窯上流の素地中の FeO 濃度の２次元（長手・横×深さ・上下）分布，
凡例 FeO［wt%］：Max. 3.8 ~ min. 0.6

素地の redox 反応の速度は小さく，槽窯内の滞留時間では平衡状態に達しない。また高温域に晒された素地は，還元性が強く，冷却域の雰囲気中の酸素を吸収する。但し，酸素の拡散係数は小さく，酸素は素地の内部に浸透しにくい。

商用のソーダライムガラスでは酸化鉄の redox 反応がある。酸化第２鉄（FeO）が近赤外域のエネルギーを吸収し，熱伝導率を小さくし，素地内部への伝熱を減らし，粘度を大きくし，熱対流を弱める。このように redox 反応が素地の熱対流に影響するため，redox 反応をモデル化して，素地中の FeO の分布を求めている，図４[5)]。

むすびに

筆者は，シミュレーション技術の商用ガラスへの応用に携わってきた。その過程でガラス会社でしか経験できない，数学モデルの妥当性の検証（verification）と実用化（validation）を進めた。窯の熱精算・温度の測定，炉内の観察，高温物性の推定などのノウハウを蓄積し，社内での技術の普及のためにソフトウェアを汎用化し，数値解法を研究して，計算の高速化を計った。このような解析ノウハウがシミュレーションによる現象の再現と予測精度の向上のためには不可欠である。そこでシミュレーション技術の発展に資するべく，平成 29（2017）年初めに「ガラス技術研究所」を設立し，技術サービスを提供している。

参考文献

1）H. Mase and K. Oda, “Mathematical model of glass tank furnace with batch melting process,” Research Report of Asahi Glass Co., Ltd., 30(2) 69-78, 1981.
2）N. Vanandruel et al, “Modeling and control of a glass melting tank via numerical simulation,” Ceramics-SiIikaty, 40(3) 81-84, 1996.
3）K. Oda and R. Fujinuma, “Uniformity and homogeneity of glass melts in a glass tank furnace,” ICG Annual Meeting 2018.
4）K. Nagai et al,” SO_3 refining model for soda-lime glass,” ICG 2007.
5）織田健嗣「ガラス槽窯における熔融ガラスの清澄性の予測法に関する研究」横浜国立大学院 2009 年 9 月 .