

ガラス溶解プロセスのシミュレーション

ニューガラスフォーラム

川地伸治

Simulation of Glass Melting Process

Shinji KAWACHI

New Glass Forum

1. はじめに

「鉄の製造に世界中同じような設備を使っているのに日本の歩留まりだけは10%も良い」, 「高い良品率は、コンピュータソフトウェアの違いだ」と聞いて、15年程前、ある製鉄会社へ勉強に出かけたことがある。高炉の中央制御室に入って驚いた。コンピュータ制御の計器類がずらりと並んだ部屋の一角に、奥出雲の製鉄の神を祀る神社から分霊されたという立派な神棚が設えられていたからである。そういえば、昔から火を扱う炉の中には神が宿っていて、操業が不調ともなれば雪中もいとわず裸足参りをしたという伝説もある。

また、エコノミスト誌 [1] とのインタビューで、工場経験の長かった技術家の日本板硝子の藤本勝司社長が「ガラス窯には人知を超えた何かがある」と述べておられるのも同じようなご経験からの発言であろう。

そんな訳で、高炉にしるガラス溶解炉にしる炉のコンピュータシミュレーションは、神の支配する炉の世界を覗く失礼な手段かも知れない。

なお、本稿は引用文献を含めて筆者の限られた知見に基づくものであり、ガラス溶解シミュレーションの全貌をご紹介できないことをあらかじめお許し願いたい。

2. ガラスの熱流動解析

ガラス溶解シミュレーションも、コンピュータの計算速度向上とハードウェアの価格低下に平仄を合わせて発展してきたと云えよう。流体の熱流動挙動は、連続の式、ナビエーストークスの式、エネルギー式の3本の基礎式(1-3)を解くことによって記述できることが、19世紀に確立されている。ようやく1970~1980年代になって、ガラス融液の熱流動挙動も研究室で手作りしたコンピュータソフトウェアによって解かれ始めた [2]。

当初は、渦度・流れ関数法を使って2次元解析が行われた。この方法は、渦度と流れ関数を定義することにより、解くべき3本の方程

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1
東京工業大学 (S7-4)
ニューガラスフォーラム東工大分室
TEL/FAX 03-5734-3997
Email: kawachi@glass.ceram.titech.ac.jp

式が過度輸送方程式 1 本に集約できるという非常に巧妙な方法である。それでも、当時のコンピュータの能力では、数千から数万メッシュの 2 次元モデルを現実的時間で解くのがやっとであった。

1990 年代以降は、超 LSI 素子を用いた高性能ミニコンやパソコンが利用できるようになり、熱流動の基礎式を直接解くことによって、ガラス溶解窯の 3 次元熱流動解析も比較的容易に行えるようになった。現在市販されている比較的クロック数の大きなパソコンなら、2 ギガ・フロップス（1 フロップス = 1 秒間に行える浮動小数点演算の回数）程度の計算速度をもっている。これは 1985 年頃のスーパーコンピュータと同等以上の性能に匹敵すると云えよう。

熱流動の基本式をコンピュータで解く手法として、有限差分法、有限体積法、有限要素法など、複雑な 3 次元解析を行うのに適した解析手法が開発された。入力データの作成、計算ロジック、結果の可視化などソフトウェアが複雑化し、ユーザー自身がプログラムを作成できる時代ではなくなった。多くの専門家の共同作業により作成された汎用熱流体解析プログラムが市販されるようになった。

3. ガラス溶解シミュレータ

ガラス溶解炉の中で生じている現象を記述するためには、表 1 で示すような種々のモデルを総合したソフトウェアが必要であると考えられる。しかし、汎用の熱流体解析プログラムが取扱うのは、多くの場合、熱流動解析モデルと燃焼・輻射伝熱モデルのみである。

熱流動解析から得られる結果は、ガラス融液内の温度分布、流速分布、粒子の滞在時間などである。これらの情報から流れのデッドゾーンや異常な温度域を発見することに役立てることができ、ガラス溶解シミュレーションが始まった当初はそれを知るだけでも新鮮な驚きであったが、やはり溶解されるガラスの品質をシミュレーションによって知りたいという願望が大きくなる。

そのためにはガラス溶解プロセスに特化したシミュレータの開発が不可欠である。ガラス溶解炉の熱流動に関しては、バブリング、電気加熱、蓄熱室などの固有の装置がもたらす影響や原料投入や泡層の生成といった動的な変化を考慮する要素がある。また、ガラスの溶解欠陥となる泡、砂利、脈理の品質やエネルギー効率、炉の寿命を予測したい。

これらのシミュレータは、物理現象だけを対象にすればよいものと化学反応を含むものに分けられる。前者は、熱流動モデル [2-8]、輻射伝熱モデル [9-10]、バブリングモデル [11]、

表 1 ガラス溶解シミュレータを構成するモデル群

サブモデル群	基幹モデル	評価モデル群
燃焼・輻射伝熱モデル ▶化石燃料の燃焼 ▶火炎・炉壁からガラス融液への伝熱	熱流動解析モデル ▶入力情報 ガラス溶解炉の幾何学的形状 ガラス溶解炉の運転条件 ▶出力情報 熔融ガラス内の温度分布 熔融ガラスの対流分布 粒子移動と熱履歴 ▶プリプロセッサ モデルの図化ソフトウェア ▶ポストプロセッサ 計算結果の可視化	気泡清澄モデル ▶清澄剤の熱分解反応速度予測 ▶熔融ガラス中の溶存ガス分布予測 ▶気泡の成長・収縮予測 ▶ガラス溶解炉の清澄性能の総合評価
バブリングモデル ▶気体の吹込みによる熔融ガラスの攪拌		砂利溶解モデル ▶珪砂の溶解モデル
電気加熱モデル ▶ジュール熱による熔融ガラスの内部加熱		均質化モデル ▶スターラー、バブリングの影響評価
バッチ溶解モデル ▶バッチ山の形成と溶解		耐火物の被侵食モデル ▶ガラス接触耐火物の残存厚さの予測
泡層生成モデル ▶熔融ガラス表面に生成する泡層の生成		熱精算モデル ▶消費エネルギーの推定
熱交換装置モデル ▶蓄熱室による燃焼空気の予熱		

電気加熱モデル [12-14]，熱交換モデル，均質化モデル，熱精算モデル [15] であり，この特徴は現象の数式による記述が比較的容易に行えることである。一方，後者には，燃焼モデル [16]，バッチ溶解モデル [17-20]，気泡清澄モデル [21-27]，砂利溶解モデル [28-29]，耐火物被侵食モデルが含まれ，これらのモデルには化学反応のメカニズムと反応速度に関する知見が必要であるが，一般には数学モデルの作成が非常に難しいことに特徴がある。

化学反応を含むモデルの例をあげると，ガラス溶解に固有のモデルであるバッチ溶解モデルでは，最終的にバッチ厚さ分布，バッチ山の形状をシミュレート結果として得たい訳であるが，考慮すべき変数として，燃焼室からの熱束，ガラス融液からの伝熱，バッチのガラス化反

応，バッチの分解ガスの影響，バッチ内部の熱伝導，等々の影響を盛り込む必要がある。バッチ溶解モデルに関しては，過去 30 年間に 20 種類近くのアプローチが提案されているが，いまだに決定的なモデルは見当たらない [30]。

4. 気泡清澄モデル

化学反応を含んだモデルの構築が難しいことを述べたが，気泡清澄モデルも清澄剤の熱分解反応を考慮しなければならないモデルである。筆者が開発したモデルに基づき，やや詳しく紹介してみよう [27]。

ガラス原料を溶解するとき，直径数十ミクロンから数ミリメートルの気泡が発生する。その数は，ガラス 1 kg 当り数百万個から数千万個である。このような気泡が清澄されるメカニズ

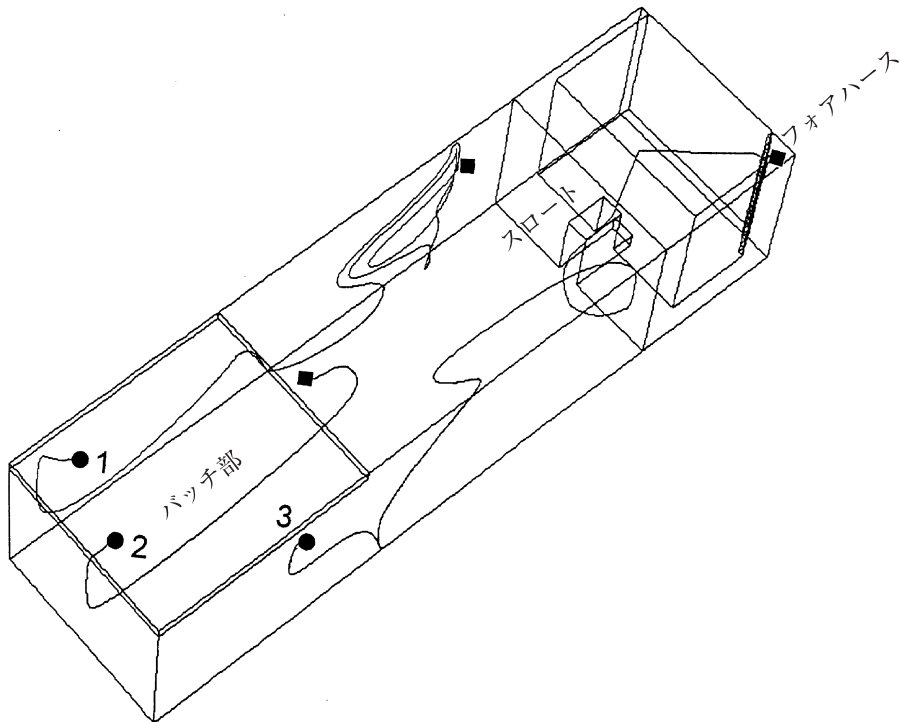


図1 気泡清澄のシミュレーション [27]

模式化したガラス窯の鳥瞰図。バッチ部のそれぞれの位置 (●印) に気泡が発生したときの行方を示す。

- 1：この気泡は，炉内に長時間滞留し，ガスが吸収されて消失。
- 2：この気泡は，いったん炉底に沈み，ガラス表面に浮上して消失。
- 3：この位置の気泡は溶解槽，清澄槽を流れて，フォアハースに流出。この場合，気泡は製品中に混入し，泡不良の原因となる。

ムは、泡がガラス融液表面に浮上して無くなるか、ガラス融液に気泡中のガスが吸収されて消失するかのいずれかである。

浮上による清澄を考える場合、気泡の浮上速度は、ストークスの式(4)で記述される。すなわち、気泡半径の二乗とガラス密度に比例し、粘度に反比例する。

ガラス中に溶解したガスが気泡中へ浸入してくると気泡は一層大きくなり、浮上速度が加速される。その浸入速度は、ガスの移動式(5)で表される。式の意味するところは、浸入速度は、気泡表面積、物質移動係数、気泡中のガス濃度とガラス融液中のガス濃度の差に比例するということである。

ガラス融液中に溶解するガスの濃度は、清澄剤の分解ガス (SO_2 , O_2) と燃焼雰囲気 (CO_2 , N_2 , H_2O など) がガラス液面に浸透した影響によって支配される。こうしたガスがガラス融液の熱対流によって炉内に拡散していく様子を記述する式が、ガスの移流拡散方程式(6)である。この式を解くことで、ガラス融液中のガスの濃度分布が求められる。

移流拡散方程式に含まれる清澄剤から発生するガス量は、清澄剤の反応速度式(7)によって記述される。この式に含まれる頻度因子、活性化エネルギー、反応次数は、清澄剤を含むガラスバッチを熱分解し、そこから発生するガスの量を測定して定めることができる。

これら一連の式を順次解くことにより、バッチ溶解時に発生した気泡が清澄されていく様子をシミュレートすることができる。その例を図1に示した。

5. まとめ

これまで紹介したガラス溶解プロセスのシミュレーションも、日々の溶解現場で起こっている現象や経験に照らしてみるとまだまだ十

分に説明できていないことが多いというのが、溶解技術者の率直な意見であろう。これは、シミュレーション用モデルを作成するときには現実を単純化し理想化することがどうしても避けられないからであり、引上量や温度などの変動を考慮していない定常状態を仮定していることにも因る。

しかしながら、このように不十分なモデルであっても、つぎのような点ではシミュレーションが有効に活用できるというコンセンサスが得られていると考えられる。

- (1) 共通言語の出現 — ガラス溶解炉には、炉の設計者、操炉担当者、ガラス研究者などの多く人が関わっているが、これらの関係者がお互いの考えを交換する共通イメージを持って議論できるようになった。
- (2) 因果関係要因の把握 — ある現象（たとえば、泡不良の増加）に対してどのような要因が影響しているかを網羅的に把握できるようになった。
- (3) 感度解析 — 種々の条件でシミュレーションを行ってみるにより、どの要因が大きく影響しているかを重み付けて考えることが可能になった。

ガラス溶解シミュレーション技術が未完成であるということは、これから取り組まなければならない課題が沢山あることの証左でもある。特に、化学反応を伴う現象のモデル化には未知の課題が多く、理論と実験の並行補完的なアプローチが不可欠である。

最近知った製鉄高炉のシミュレーションでは、火入れから操業停止までのライフタイムに亘って3次元の非定常解析が可能になっているとのこと。その意味で、鉄鋼のシミュレーション技術は、神様の世界を見せていただくことに我々より多く成功しているようである。

補遺 1 熱流動解析の基本式群

添え字はアインシュタインの規約を用いて表現している。

・連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

溶融ガラスは非圧縮性であると仮定して、この式が成り立つ。

・ナビエーストークスの式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + K_i \quad (2)$$

ただし $K_i = \{0, 0, g\beta((T - T_0))\}$ である。ここでは、ブジネ近似という仮定を置いている。ブジネ近似というのは、ガラスが熱膨張によって浮力を生ずることは認めるが、ガラスレベルを変えるほどには、膨張しないという仮定である。

・エネルギー式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

この式は、ロッセランド近似という仮定を置いている。熱は輻射と伝導という二つのメカニズムによって伝わるが、輻射と伝導とを一まとめにした見掛けの熱伝導率を仮定したのがこの近似である。

[記号の意味] u : 流速, x : x 方向の距離, t : 時間, p : 圧力, ρ : 密度, ν : 動粘性係数張係数, g : 重力加速度, T : 温度, T_0 : 基準温度, λ : 温度拡散率

補遺 2 気泡清澄の基本式群

・ストークスの式

$$\nu = \frac{2}{9} \cdot \frac{gr^2\rho}{\eta} \quad (4)$$

[記号の意味] ν : 速度, g : 重力加速度, r : 気泡半径, ρ : ガラス密度, η : ガラス粘度

・ガスの移動式

$$I = 4\pi r^2 K (C_b - C_a) \quad (5)$$

[記号の意味] I : 泡に出入りする単位時間当たりのガス量, K : 物質移動係数, C_b : 泡に接するガラス中のガス濃度, C_a : ガラス融液中のガス濃度

・ガスの移流拡散方程式

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + u_i \frac{\partial C_k}{\partial x_i} = D_k \frac{\partial^2 C_k}{\partial x_i^2} + S_k \quad (6)$$

[記号の意味] C : ガス濃度, D : ガス拡散係数, S : 清澄剤から発生するガス量, k : ガスの種類

・清澄剤の分解反応速度式

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp \left\{ \frac{-E_a}{RT} \right\} (1 - \alpha)^n \quad (7)$$

[記号の意味] α : 未反応率, A : 頻度因子, E_a : 活性化エネルギー, R : 気体定数, T : 温度, n : 反応次数

参考文献

- [1] エコノミスト, 毎日新聞社, 2007. 1. 16 号, 4-5
- [2] Clomburg, L. : Mathematical and experimental modeling of the circulation patterns in glass melts, Ph.D Thesis (1971)
- [3] Leyens, G. : Contribution to the calculation of two-dimensional convection flows in continuously operated glass-melting tank furnaces, Part 1, Glasstechn. Ber. 47, 251-259 (1974), Part 2, ibid., 261-270
- [4] Moul, A. : Two and three dimensional mathematical models for glass tank furnaces, Glass Technol. 23, 106-112 (1982)
- [5] Simonis, F., de Waal, H., Beerkens, R. : Influence of furnace design and operation parameters on the residence time distribution of glass tanks predicted by computer simulation, Proc. XIV. Int. Congress on Glass (Calcutta 1986), Vol. 3, 118-127
- [6] Carvalho, M. G., Nogueira, M., Wang, J. : Mathematical modeling of the glass melting industrial process, Proc. XVII. Int. Congress on Glass (Beijing 1995), Vol. 6, 69-74
- [7] Leyens, G., Smrcek, J., Thyn, J. : Use of isotope measurement technology and a mathematical model to determine the residence time distribution in a glass tank, Glasstechn. Ber., 53, 124-129 (1980)
- [8] Bauer, J., Roger, U., Simons, P. : Validation of a mathematical glass tank model, Glasstechn. Ber., 72, 171-181 (1999)
- [9] Lankhorst, A. M., Muijsenberg, H. P. H., Sanders, M. P. J. : Coupled combustion modeling and glass tank modeling in oxy- and air-fired glass-melting furnaces, Proc. Int. Symp. on Glass Problems, Vol. 1, 378-384 (Istanbul 1996)
- [10] Wang, J., Brewster, B. W., Webb, B. W., McQuay, M. Q., Bhatia, K. : A coupled combustion space/batch/melt tank model for an industrial float glass furnace, Proc. 5 th Int. Seminar, 84-93 (Vsetin 1999)
- [11] Hoke, B. C. : Application of glass melt modeling for examining forced bubbling design, Ceramics-Silikaty, 44, 14-19 (2000)
- [12] Chen, T., Goodson, R. E. : Computation of three-dimensional temperature and convective flow profiles for an electric glass furnace, Glass Technol. 13, 161-167 (1972)
- [13] Austin, M. J., Bourne, D. E. : Mathematical model of an electric glass furnace, Glass Technol. 14, 78-84 (1973)
- [14] Ghandakly, A. A., Curran, R. L. : Simulation of multiphase multielectrode electric glass melters, Proc. Summer Compt. Simulation Conf. (1988)
- [15] Nelson, F. J., Poolos, W. A. : Computer simulation of the energy-related behavior of electrically boosted furnaces, Cer. Eng. Sci. Proc. 15, 115-127 (1984)
- [16] 数値流体力学編集委員会編 : 燃焼・希薄流・混相流・電磁流体の解析, 東京大学出版会 (1995)
- [17] Mase, H., Oda, K. : Mathematical model of glass tank furnace with batch melting process, J. Non-Cryst. Solids, 38/39, 807-812 (1980)
- [18] Ungan, A., Viskanta, R. : Melting behavior of continuously charged loose bath/blankets in glass melting furnaces, Glasstechn. Ber. 59, 279-291 (1986)
- [19] Wang, J., Brewster, B. S., McQuay, M. Q., Mardson, Q., Web, B. W. : Validation of an improved batch model in a coupled combustion space/melt/

- batch melting glass furnace simulation, *Glastechn. Ber.* 73, 299–308 (2000)
- [20] Chang, S. L., Zhou, C. Q., Golchert, B., Petrick, M. : Simulation of multi-phase glass-melt flows in a glass melter, *Proc. 2001 ASME Int. Mech. Eng. Cong. & Expo.*, 73–80 (2001)
- [21] Carvalho, M. G., Wang, J., Nogueira, N. : Investigation of glass melting and fining processed by mean of comprehensive mathematical model, *Ceramic Transactions* 82, 143–152 (1997–1998)
- [22] Kraemer, F. : Simulation of fining in specialty glass, *Ceramic Transactions* 82, 7–17 (1997/1998)
- [23] Nemeč, L. : The behavior of bubbles in glass melts, Part 1, *Glass Technol.* 21, 134–138 (1980), Part 2, *ibid.*, 139–144
- [24] Weinberg, M. C., Onorato, P. I. K., Uhlmann, D. R. : Behavior of bubbles in glass melts, *J. Am. Ceram. Soc.* 63, 175–180 (1980)
- [25] Balkanlı, B., Urgan, A. : Numerical simulation of bubble behavior in glass melting tanks, Part 1, *Glass Technol.* 37, 29–34 (1996), Part 2, *ibid.*, 101–105, Part 3, *ibid.*, 137–142, Part 4, *ibid.*, 164–168
- [26] Beerkens, R. : The role of gases in glass melting processes, *Glastechn. Ber.* 68, 369–390 (1995)
- [27] Kawachi, S., Kawase, Y. : Evaluation of bubble removing performance in a TV glass furnace, Part 1, *Glastechn. Ber.*, 71, 83–91 (1998), Part 2, *ibid.*, 111–119
- [28] Beerkens, R., Muijsenberg, H. P. H., Heijden, T. : Modeling of sand grain dissolution in industrial glass melting tanks, *Glastechn. Ber.*, 67, 179–188 (1994)
- [29] Chaudhary, M. K. : The effect of free convection on the dissolution of a spherical particle in a viscous melt, *Glass Technol.* 29, 100–102 (1988)
- [30] Kuhn, W. : *Mathematical Simulation in Glass Technology*, Springer (2002)