

UDC : 666.1.031 : 681.5.017

1. ガラスの溶解・成形シミュレーション技術の展望

Prospect of Simulation Technology on Glass Melting and Forming

伊藤 肇*・上堀 徹**

Hajime Itoh and Toru Kamihori

ガラスの溶解および成形プロセスにおける数値シミュレーション技術に関して概括する。溶解および成形過程のガラスは物性的にもプロセス的にも独自の特徴をもっているため、シミュレーション技術においては、その特徴に即した独特な数学的モデリングや計算手法が開発され適用されている。今やシミュレーション技術はプロセスの設計や操作を行う上で、重要なツールとして広く活用されている。

まず、ガラスの溶解および成形プロセスについて概要を紹介し、現象の特徴や特性について述べる。プロセスにおける様々な問題や課題を解決する上で、シミュレーション技術への期待が高まっている背景についても触れる。

次に、溶解プロセスのシミュレーションにおける数学的モデリングと理論について紹介する。溶解槽の内部の現象、各々の現象に対する数学的モデリング、ガラスの品質モデルについて順に述べる。次いで、成形プロセスの一例としてフロートプロセスをあげ、そのシミュレーション技術について紹介する。フロートプロセスの概要およびフロートバス内現象のメカニズムのエッセンスについて述べ、数学的モデリングとその理論的背景についても言及する。溶解および成形のシミュレーション技術における最近の進歩や取り組みについても紹介する。

最後に、溶解および成形プロセスのシミュレーション技術が進化するための課題をまとめ、今後の展望を総括する。

Numerical simulation technology on glass melting and forming process is overviewed. In the simulation technology, original mathematical modeling and computational schemes have been developed because of the unique characteristics of glass properties and processes. This simulation technology is widely used as an important tool for the design and the operation of the processes.

Firstly, general outlines of the glass melting and forming process are introduced. Then the characteristics and the feature of the phenomena are referred. The background of expectations for the simulation technology is also introduced in order to solve various problems we have been facing.

Secondly, mathematical modeling and theory of the simulation on melting process are introduced. Phenomena in a melting tank, mathematical modeling for each phenomenon, and glass quality model are described in order. Then the simulation technology on a float process is described as an example of forming process. After introducing the outline of

*中央研究所 主幹研究員 (E-mail : hajime-itoh@agc.co.jp)
Manager of Research Center

**中央研究所 主幹研究員 (E-mail : toru-kamihori@agc.co.jp)
Manager of Research Center

the float process and the essence of the process mechanism in the float bath, mathematical modeling and theory of the simulation are referred. Moreover the recent progress and the challenge of the melting and forming simulation are mentioned.

Finally, technological challenges of the melting and forming simulation are surveyed.

The prospect and the outlook are shown with high expectations.

1. ガラス溶解・成形プロセスの概要

1.1 ガラス溶解プロセス

ガラスの溶解プロセスでは、珪砂・ソーダ灰・ガラス片などの原料を調合・混合した後約1500℃まで加熱して溶融ガラスを生成する。溶融ガラスが生成される過程で、均質化・脱泡が行われる。その後、成形が容易な温度である約1000℃まで冷却し、フロート成形・プレス成形等によって様々な製品を製造している。調合したガラス原料を溶融し、成形に必要な溶融ガラスを作る溶解プロセスをガラス槽窯 (Fig. 1) と呼ぶ。

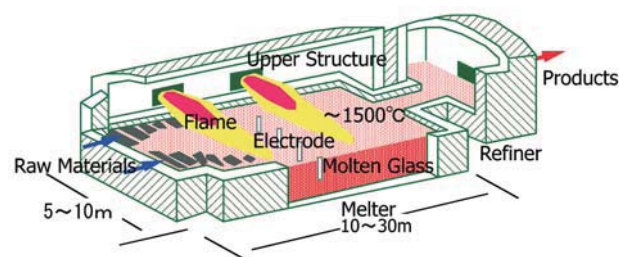


Fig. 1 Schematic view of a glass melting tank.

ガラス槽窯は通常高温耐久性をもつ電鍍煉瓦等で構成された容器になっており、容器の下部に溶融ガラスが満たされている。容器の上部は上部燃焼空間と呼ばれる燃焼空間が存在する。上部燃焼空間ではバーナーが設置され、燃焼加熱と放射・対流等の伝熱現象により溶融ガラスを加熱する。加熱源は上述の燃焼において重油・天然ガス等が用いられる他、溶融ガラスに直接通電する、あるいは電気ヒーターを用いて間接加熱する方法なども行われる。

バッチと呼ばれる投入されたガラス原料は、上部燃焼空間および溶融ガラスの両者によって加熱され、数段の化学反応を経た後液状化し容器の下部に溶融ガラスとなって流下する。流下した直後の溶融ガラスは非常に不均質であり、また多数の泡・未溶融原料をともなっている。溶融ガラスは、ガラス槽窯内を通過する間に均質化・未溶融原料の溶解・脱泡が行われる。ガラスの品質は、この過程においていかに溶解直後のガラスを精錬していくかにかかっており、多くの制約条件の中で効果的な溶解・均質化・脱泡を行うことが、ガラス槽窯の設計・操作における最重要課題となっている。

ガラス槽窯内の溶融ガラスは、炉内の温度分布により熱対流を形成しているのが大きな特徴である。対流構造の違いによって、ガラス槽窯内を通過する

溶融ガラスの履歴が大きく変化し、上述の品質決定において支配的な影響を及ぼす。したがって、溶融ガラスの対流構造を把握し、理想的な対流構造を形成する設計・操作を行えるようにすることが大変有用となる。

ガラス槽窯内部の溶融ガラスは流体力学上きわめて特殊な性質をもっている。溶融ガラスは運動量の拡散速度に対してエネルギーの拡散速度が非常に小さい、高プラントル数流体という物性上の特徴を有しており、それにとまって熱対流の非線形性を示す無次元数であるレーリー数が非常に高いため、熱対流が複雑になる。そうした点で、他に類似の特徴を有する対流は地球マントル対流が挙げられる。また溶融ガラスの物性は強い温度依存性があり、現象をより複雑化している。

上記の通り、ガラス槽窯は内部で発生している現象が非常に複雑であり、その内部の現象把握が困難である。そのため、槽窯の設計・操作は多くの『勘と経験』が必要とされてきた。しかしながら昨今のガラス製品に求められるニーズの高度化・多様化・変化のスピードアップに伴い、製造プロセスに対する問題解決の高度化・迅速性向上が競争力強化のために必要不可欠となってきている。また、ガラス槽窯は典型的なエネルギー多消費プロセスであり、加熱を行う上で多量のエネルギーを消費した上に多量のCO₂を排出する。そのためガラス槽窯の中で品質と両立しつついかにエネルギー消費量・CO₂排出量を削減していくかについても今後のガラス製造業のかかえる主要課題のひとつである。このような問題に対するソリューション技術の一つとして、シミュレーション技術は有効なツールとなりうる。

1.2 ガラス成形プロセス

ガラスの成形プロセスは、ガラス製品の種類や要求品質や要求コストなどにより多岐多様にわたるが、プレス成形（押型）、ブロー成形（吹き）、ドロウ成形（引き伸ばし）、ロール成形（圧延）、フロート成形、紡糸成形などに大別することができる。たとえば、ビンガラスはブロー成形により、板ガラスはフロート成形やロール成形やドロウ成形により、管状ガラスはドロウ成形によりつくられる。多岐多様にわたる成形プロセスではあるが、それらを貫く成形の本質は普遍である。すなわち、ガラスの粘性が温度の低下に伴い連続的かつ急速に増加していくという性質を巧みに利用し制御することによって、ガラスの形をつくりあげるのである⁽¹⁾。

溶融ガラスを所望の形状に成形するためには、ガ

ラスに所定の粘性分布すなわち温度分布を形成し、所定の外力を付与あるいは所定の形状に拘束すればよい。ところがガラスの温度分布は、加熱源や冷却源のみならず、金型やロールや炉材やガスやスズなどの成形媒体の熱伝達に大きく影響される。一方成形媒体は、温度場やガラスの挙動の影響を受けて変形・流動し、ガラスへの外力付与や形状拘束の条件を変化させたり温度場を変化させたりする。したがって、ガラス成形のポイントは、ガラス自体の流動・変形のみならず、成形媒体の挙動、およびガラスも成形媒体も含めた系全体の温度場、の3点を如何に把握し制御するかに尽きる。また、成形媒体やガラス表面における化学反応も品質や生産性を大きく左右する重要な要素である。

ガラス成形プロセスにおいては、高温であること、測定による外乱が排除できないこと、測定手法自体が確立されていないことなどから、ガラスや成形媒体の温度分布や変形・流動を把握することは非常に困難である。そのため、現象の科学的な理解が進まず、勘と経験に多分に頼った操作や設計をせざるを得ないのが実情であった。現象を定量的に把握し、科学的に理解する有効な手段として、シミュレーション技術への期待は非常に高い。また、操作の最適化や試行錯誤期間の短縮化、生産性向上、高品質化、あるいはプロセスの最適設計への貢献は言うまでもなく、成形方法を抜本的に革新するための有力なツールとしての機能も期待されている。

2. ガラス溶解シミュレーション技術

2.1 槽窯内部を支配する現象

ここでは溶解シミュレーションを構成する前提条件となる、槽窯内部の基本現象について具体的に述べる。ガラス槽窯の設計・操作を決める際、考慮すべき基本現象は、大きく2種類に分けて考えることができる。一つはガラス槽窯内での伝熱や溶融ガラスの対流といった、ガラス槽窯内の物理現象の把握・定量化を行うものである。ガラス槽窯内の燃焼・伝熱・原料の溶融・溶融ガラスの流動などのおののに対してシミュレーションによるモデル化・数値解析のアプローチを行う必要がある。もう一つ

は、ガラス槽窯内での物理現象によって変化する。原料溶解・均質化・脱泡清澄などの物理・化学現象を把握・定量化を行うものである。具体的には溶融ガラス内の温度、流れにより変化する、溶存ガス濃度、酸化還元状態などをモデル製品品質に及ぼす影響に対してもシミュレーションによるモデル化、数値解析のアプローチが行われている。Fig. 2に槽窯シミュレーションを構成するモデル群とその関係を示す。槽窯シミュレーションはこれらのモデル群を連成して活用する。

2.2 槽窯内現象のシミュレーションモデル

上部燃焼場は、流れ・伝熱・燃焼の複合現象によって表され、支配方程式は質量・運動量・エネルギー・化学種に関する保存式、状態方程式、化学反応式によって記述される。上部燃焼場におけるエネルギー移動で支配的となるのは放射伝熱であり、放射伝熱のモデル化は必要不可欠となる。放射伝熱の計算においては、 CO_2 ・ H_2O 等燃焼雰囲気ガスが持つ放射吸収の影響を考える必要がある。放射の他気流による対流伝熱が存在するが、対流伝熱の効果は放射伝熱のそれに比べると小さい。その一方、燃焼空間内の気流によってアルカリ雰囲気等の動きを知りたい場合等も存在する。対流伝熱の影響・雰囲気等の挙動等を考察する場合には、上部燃焼空間内における乱流シミュレーションを行う。燃焼現象のシミュレーション法としては計算時間等の実用性を考慮し、乱流燃焼モデルが用いられる。さらに燃料に重油等の液体燃料を用いる場合の高精度なシミュレーションには、噴霧火炎のシミュレーション技術が必要となってくる。

投入原料の溶融過程は、バッチモデルと呼ばれるシミュレーションが行われる。ここでは、投入された原料が上部燃焼空間および溶融ガラスからのエネルギーを吸収して化学反応を伴いながら溶解し、バッチ形状や溶融ガラスへの流入パターンの予測・定量化を行うことを目的とする。バッチの溶融現象はモデル上では化学反応を伴ったエネルギー方程式で表される。また、ガラス槽窯の場合、溶融ガラスの対流に対しバッチ形状の影響が大きい。バッチ形状の計算は一般的に粉体と溶融物の混合体であるバッチを擬似的に粘性流体と考え、溶融ガラスと同時に計算する方法が取られている。

ガラス槽窯内の溶融ガラスの流動・伝熱現象は、温度差によって生じる浮力項が駆動する流れ場の形成および、対流・伝導などのエネルギー輸送が同時進行することにより記述される。したがって支配方程式は、浮力項を考慮した運動方程式・質量保存式・エネルギー方程式の3つとなる。溶融ガラスに直接通電してジュール熱加熱を行う場合には、上記3方程式に静電場方程式も加わる。

上述の通り、溶融ガラスは高プラントル数流体という物性上の特徴を有しており、それにとまって熱対流の非線形性を示す無次元数であるレーリー数

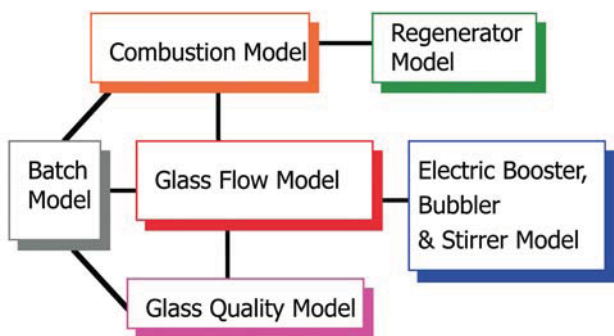


Fig. 2 Submodels of the glass melting tank simulator.

が非常に高いため、運動方程式とエネルギー方程式の相互作用が強く、エネルギー方程式の対流項の影響による強い非線形性を持つ。さらに粘度等の物性が強い温度依存性を持ち、モデル化にあたってはこれらを十分考慮する必要がある⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

2.3 品質の評価シミュレーションモデル

品質評価のモデル化は、溶融ガラスが原料から溶融した後槽窯の出口に流出するまでの過程における履歴を追う等のマクロ的観点、および原料シリカ粒子の溶解挙動・溶融ガラス中の気泡挙動・溶融ガラス中の溶存ガス挙動・酸化還元状態の挙動等ミクロ的観点の両面からのアプローチが行われている。溶融ガラス中の品質決定は、さまざまな物理・化学的現象により決定されるが、それらの現象は溶融ガラスが置かれている環境、すなわち槽窯内の温度場や流れ場の影響に大きく支配される。

2.4 槽窯シミュレーション技術の進展と技術課題

現在では計算機の発達・低価格化とシミュレーション技術の発展によって、比較的複雑な3次元のガラス槽窯内の現象が短時間で計算可能となっており、ガラス槽窯の設計・操作上の問題解決になくはならない存在になっている。その一方、現象の複雑さゆえに未だ多くの解決すべき研究課題が残っているのも事実である。

その一つとしてシミュレーションの高精度化が挙げられる。シミュレーション精度の向上には大きく3つのアプローチを並行して進める必要がある。1番目は数学モデルそのものの高精度化である。より現象の本質をつかんだモデルの作成・選択が必要であり、この例としては燃焼モデルの選択等があげられる。2番目は数学モデルを、コンピュータを用いて実際に計算する場合の高精度化である。捉えたい現象を数値解析上で高精度に再現するためには、分割メッシュなどの空間的離散化の度合、時間刻みなどの時間的離散化の度合、さらには数値解法等の信頼性に十分留意する必要がある。3番目は、シミュレーションで用いる物性値同定の高精度化である。どんなに良い数学モデル・計算スキームを用いても、実際に計算する場合に用いる物性値が信頼性の低いものであると、解も同様に信頼性の低いものになってしまう。特にガラス槽窯の場合、高温ガラス融液の物性測定は大変困難な学術的にも挑戦的なテーマであり、日本国内はもちろん全世界的にも注目度が大きいテーマのひとつである。

2.5 酸素燃焼技術と電気溶融技術

冒頭でも述べた通り、ガラス製品に求められるニーズの高度化・多様化・スピードアップへの対応、あるいは環境問題への対応要請がガラスプロセスに対し近年強まっている。こうした中で、ガラス溶解プロセスでは従来とは違った新技術によって

ニーズに対応する動きが存在する。このような動きの一例として、酸素燃焼技術と電気溶融技術を簡単に紹介する。

酸素燃焼技術は、従来燃焼に用いてきた燃焼空気を、酸素に置き換えることにより燃焼効率の向上・省エネルギーを行う。従来では一般的に燃焼は重油あるいはガスと空気の混合によって行われていたが、空気中に含まれる窒素等燃焼に直接寄与しないガスにエネルギーのかかなりの部分が費やされていた。熱交換器等の使用による回収にも限界があった。それに対し酸素燃焼によりそのようなエネルギーロスを回避でき、エネルギー効率が高く、CO₂排出量の少ないプロセスを実現できる。

酸素燃焼技術のガラス槽窯での適用は現在着実に進みつつあるが、その際に溶解シミュレーション技術は大きな役割を果たす。設計の段階では加熱に必要な燃料および酸素の推定を行う必要があるが、そうした推定は溶解シミュレーションを用いることが必要不可欠となっている。また、従来の空気燃焼方式を酸素燃焼方式に転換するような場合の適正なバーナー配置・槽窯形状の決定、さらには実操作時におけるオペレーション感度予測等においてもシミュレーション技術は多大な力を発揮する。

電気溶融技術も、環境に対応するもうひとつのアプローチであり、排ガスによるエネルギーの持ち去りが無く、入力したエネルギーをほぼ全てガラス製造に必要なエネルギーとして活用することが出来る。電気溶融技術の導入においても、シミュレーション技術は大きな役割を果たしており、ガラス溶解に必要な電極設計・ガラスを効果的に加熱するための炉材設計、品質と効率の両立を行うための設計等においてシミュレーション技術が広く活用されている。

3. ガラス成形シミュレーション技術

3.1 フロートプロセスにおける現象と特徴

本稿では、フロート成形プロセスを例に挙げて解説する⁽⁵⁾。板ガラスの成形プロセスとしては、溶融スズ上に溶融ガラスを流し込んで平滑面を得るフロートプロセスと呼ばれる連続プロセスが広く採用されている⁽⁵⁾。フロートプロセスの設備概要をFig. 3に示す。フロートバスと呼ばれるスズ浴槽に流し込まれた溶融ガラスは、表面張力と重力とのバランスで約7 mmの平衡厚さになるまで広がった後、出口に向かって牽引されながら冷却されるが、徐々に固化する過程でトップロールおよびレヤーロールで延伸されて所望の厚さまで薄く成形される。フロートプロセスにおいては、ガラスに接する溶融スズおよびバス内のガスが成形媒体である。

ガラスの粘性は温度に対して非常に敏感であるので、ガラスの成形状態を把握するためには温度分布を詳細に把握する必要がある。フロートバス内は通常600℃以上なので、温度場は輻射熱伝達によって

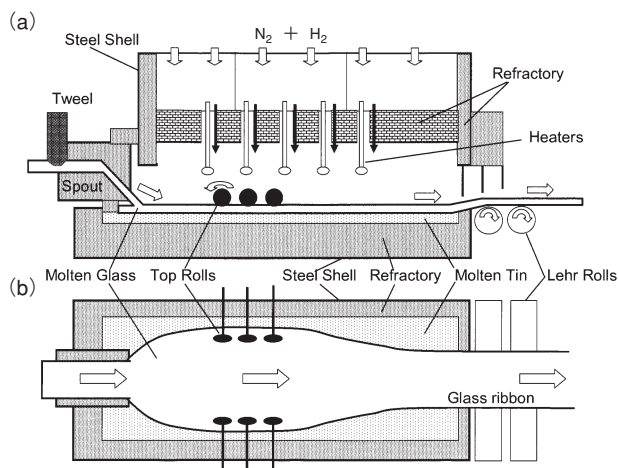


Fig. 3 Schematic view of a float bath.
(a) Cross-sectional view (b) Planar view

支配されるが、粘性が低くかつ熱容量が大きい溶融スズの対流熱伝達やガラスの流れによる顕熱移動にも大きく影響される。一方、溶融スズの流れは、熱対流やガラスによるせん断により決定される。すなわち、フロートプロセスにおいては、ガラスの成形と温度場と溶融スズ流れが相互に影響を及ぼし合っている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

また、溶融スズの酸化を防止するため、フロートバス内の空間には還元性のガス（通常は窒素と水素の混合ガス）が主にバス上部から導入されており、かつバス内部は外気よりも正圧に保たれている。Fig. 4に示すように、フロートバス内では、スズおよび酸素や硫黄などの不純物質が相状態や化合物状態を変化させながら、ガラス、スズ浴、バス内空間の間を輪廻している⁽⁶⁾。この現象は、フロート板ガラスの品質に大きく関与するため、ガラスや溶融スズの流れのみならず、バス内空間のガスの流れを把握することもまた重要である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。ガス流れは、熱対流とガラスによるせん断およびバス内に導入されるガスの流量分布とバス外に排気されるガスの流量分布により決定される⁽¹⁰⁾。Fig. 5にガラスの成形、温度場、溶融スズ流れ、およびガス流れの相互の関係を模式的に示す。

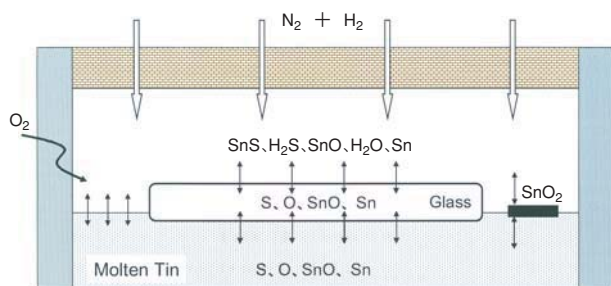


Fig. 4 Image of the cycle of tin and other contaminants (sulfur, oxygen) inside the float bath.

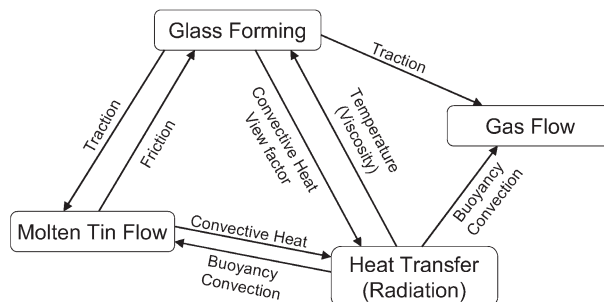


Fig. 5 The relationship among phenomena (glass forming, temperature field, molten tin flow, and gas flow) in the float process.

3.2 フロートバス内現象のシミュレーションモデル

フロートバス内現象のシミュレーションモデルは、成形モデル、溶融スズ流れモデル、温度場モデル、ガス流れモデルから構成される。これらを上述した各々の現象の特徴に即して相互にカップリングさせることにより、フロートプロセスをシミュレートすることができる。さらに、これらのマクロモデルをベースにして、成形品質や欠点品質を評価するためのモデルを適宜開発することができる。

3.2.1 成形モデル

フロートバス内のガラスの流れは、レイノルズ数1以下の完全な層流となっている。また、バス内のガラスはリボンと呼ばれるように巾や長さ比べて厚さが非常に薄いため、浅水近似と呼ばれる手法を適用し、平面内の2次元問題に置き換えてシミュレートするのが一般的である。具体的には、ガラスの上面はガス、下面は溶融スズと接しているため水平方向の速度は厚さ方向に一定であると仮定して、3次元の基礎方程式を厚さ方向に積分して得られる2次元の方程式を解く⁽¹¹⁾。

3.2.2 溶融スズ流れモデル

フロートバス内のスズ浴は、巾や長さ比べて厚さが非常に薄い、流れが3次元的な乱流となるため、ガラス成形モデルのように浅水近似を適用することができず、3次元解析を実施する必要がある。扁平なスズ浴に対して3次元の解析メッシュを生成する際、解析の精度を確保するためには、莫大な数のメッシュが必要となる。スズ流れシミュレーションには大規模解析が必要となることが特徴である⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹²⁾。

3.2.3 温度場モデル

フロートバス内は、ヒーターやクーラーやトップロールなど多くの付帯設備が設置されているため、複雑な内面形状を持つ巨大な輻射場となっている。シミュレーションにあたってのポイントは、形態係数の忠実な計算と熱収支の保証である。したがって、温度場シミュレーションにも大規模解析が必要となる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

3.2.4 ガス流れモデル

フロートバス内空間のガス流れは、圧縮性流体の層流流れとなっている⁽¹⁰⁾。得られた速度分布を用いて不純物の移流拡散を解くと、バス内の不純物濃度を計算することができる。

3.3 成形シミュレーション技術の進展と技術課題

ガラス製品に対する形状精度向上やコストダウンの要請は日増しに高まっている。また、ガラスという非常にユニークで魅力ある素材にソリューションを求める市場のニーズは、潜在的に非常に大きいものがあると確信している。それらのニーズにタイムリーにかつ的確に答えるためには、成形技術の更なる改良・革新・飛躍が必須となるが、その鍵を握る技術の一つがシミュレーション技術である。シミュレーション技術の進展の方向性としては、“高精度化・高速化”と“使える化”の二つの方向性がある。前者は複雑に絡み合う現象を忠実に高速に再現する方向性であり、モデリングの厳密化や数値解析手法の高精度化・高速化が課題である。後者は、勘や経験に依存しがちな操作や設計の実践場面で使えるインタラクティブなシミュレーションを志向する方向性である。シミュレーションの大前提となる境界条件や初期条件が、実践場面で規定されることの多い成形技術においては、特に重要な課題であろう。ガラスの形状を意のままに操り、自在に成形することは、成形技術者の夢である。夢の実現への強力なツールがシミュレーション技術であり、その進展への期待は非常に高い。

4. 結 言

以上、ガラスの溶解・成形シミュレーション技術についての現状を中心に紹介を行った。これまで述べてきた通り、ガラスプロセスは様々な物理・化学現象が複雑に絡み合ったシステムである。そのためシミュレーション技術は非常に多くの工学的分野が総合化されてはじめて信頼性の高い技術となる。

今後のシミュレーション技術の課題としては、

- ・ ガラス製造において発生する技術課題に応じたモデル化技術の構築
- ・ 現象の忠実かつ厳密なモデル化
- ・ 高速で信頼性の高い数値計算スキームの構築
- ・ インタラクティブなシミュレーションシステムの構築
- ・ ガラスの高温物性の高精度な測定
- ・ 新技術開発に向けたシミュレーション技術の構築

等が挙げられるが、いずれも広範な学問的分野における高度な技術を融合していく必要がある。

一参考文献一

- (1) 山根正之ら、「ガラス工学ハンドブック」、朝倉書店(1999).
- (2) 真瀬 洋ら、*the glass*, **38**, 24 (1995).
- (3) H. Mase and K. Oda, *J. Non-cryst. Solids*, **38**, 807 (1980).
- (4) H. Itoh, et al., *Proc. XVII ICG vol. 6*, **81** (1995).
- (5) 上堀 徹、フロートプロセスのコンピュータシミュレーション、*NEW GLASS*, **22** (2007).
- (6) L.A.B. Pilkington, The float glass process, *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, **314**, 1-25 (1969).
- (7) T. Kamihori, M. Iga, S. Kakihara and H. Mase, An integrated mathematical model of float process, *J. Non-Crystalline Solids*, **177**, 363-371 (1994).
- (8) T. Kamihori, M. Iga, S. Kakihara, R. Akagi and H. Mase, An integrated mathematical model of float process, *Reports of the Research Laboratory, Asahi Glass Co., Ltd.*, **45**, 15-28 (1995).
- (9) Charlene A. Falleroni, Controlling Top Surface Defects in Float Glass, *CERAMIC INDUSTRY*, Dec. 31-35 (1995).
- (10) Nobuyuki Ban, Toru Kamihori and Hiroshi Takamuku, A study of the behavior of volatiles in the float process, *J. Non-crystalline Solids*, **345 & 346**, 777-781 (2004).
- (11) M. Iga and H. Mase, NUMERICAL SIMULATION OF FLOAT GLASS FORMING PROCESS, *Proc. 1st Int. Conf. and Exhibition on Computer Applications to Material Science and Engineering-CAMSE '90*, 577-579 (1991).
- (12) 上堀 徹、伊賀元一、斉藤恒洋、板ガラスの製造プロセスにおける溶融金属の流れの数値解析、第31回乱流シンポジウム講演論文集 187-188 (1999-7).