

## ガラスの製造，加工技術の革新と高機能化

Innovation of Manufacturing and Processing Technologies and Enhanced Functionality of Glasses  
**Key-words** : In-flight melting, Process simulator, Strengthening of glass, Thin glass

井上 悟・長嶋 廉仁

Satoru INOUE\*<sup>1</sup> and Yukihiro NAGASHIMA\*<sup>2</sup>

(\*<sup>1</sup>National Institute of Materials Science, \*<sup>2</sup>Nippon Sheet Glass Co., Ltd.)

### 1. はじめに

ガラスの分野における研究技術は、図1に示したロードマップにあるように、ガラスの熔融や成形、加工技術の革新や生産性向上、CO<sub>2</sub>排出の削減や環境負荷の低減等による循環型社会の構築、あるいは新組成の探索や組成、構造の精密制御等によりその特性を極限まで高めた次世代高機能ガラスの創出を目的としている。現在、大学、研究機関ならびに産業界において科学、技術の両面から発展のための努力が続けられている。本稿では、これらの目標の基に進められている、ガラス熔融技術の革新および現行技術の向上のための研究開発、近年大きな進展が見られたガラスの高強度化、薄板・軽量化の分野での研究開発の動向について述べ、ガラス分野での研究技術動向の一端を紹介したい。

### 2. ガラス熔融の革新技術および現行技術の向上

#### 2.1 ガラス気中溶解技術

ガラス気中溶解技術は、ガラス原料溶解に必要なエネルギーを可能な限り削減することを目的とする革新的熔融技術として開発された。すなわち、プラズマと酸素バーナーの複合熱源を用い、なおかつ、熱源から原料への熱伝達効率を良くするためプラズマ中に原料を投入する。複合加熱源により顆粒状バッチが気中で1秒以内に溶解する。図2に現行のシーメンス型溶解と気中溶解の原理図を示した。熱伝達の高効率化、設備の省スペース化、そして結果的にプロセスの単純化が飛躍的に進むことになる。この結果、大幅に溶解槽の体積が削減され、大きな溶解槽に長時間高温の融液を保持しておく必要がなくなり、その分のエネルギーが削減できる。

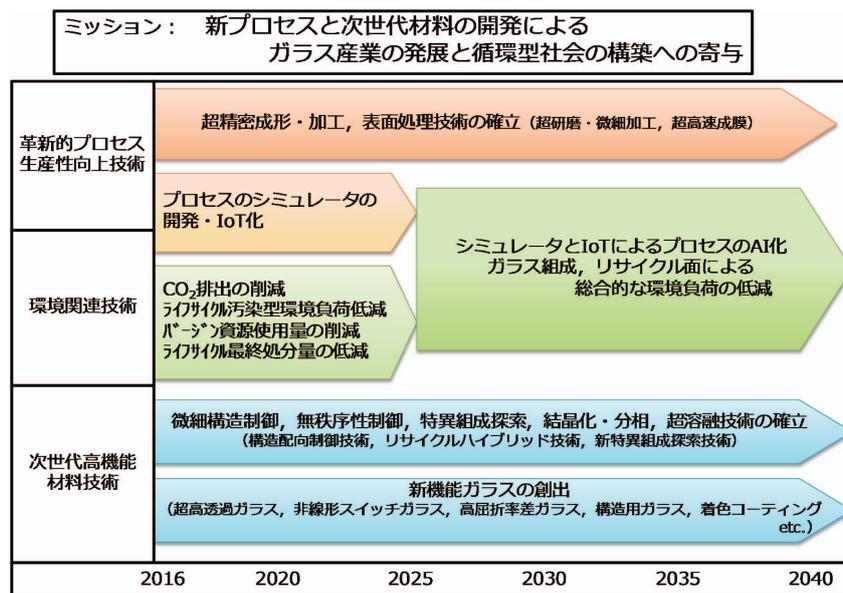


図1 ガラス分野のロードマップ

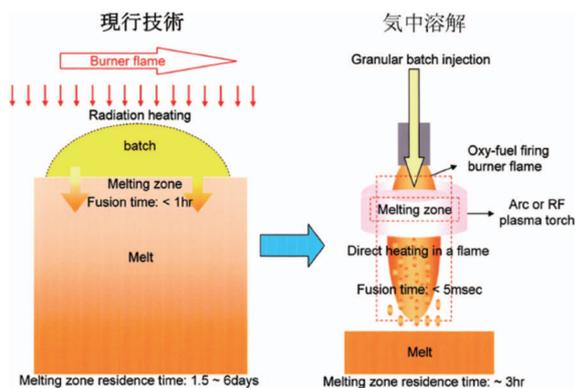


図2 気中溶解の原理

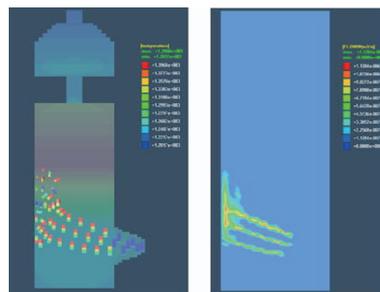
ソーダ石灰ガラス組成の酸素ガスバーナー溶解において 900kcal/kg-glass の燃料原単位（現行の約7割）を、また、バーナー加熱で液晶ディスプレイ等用の無アルカリホウケイ酸塩系ガラスを 2800kcal/kg-glass の効率（現行の約5割）で溶解し得ることが 1t/day 規模のテストプラントにより実証されている<sup>1)</sup>。プロセスの最適化によりさらに向上する。気中溶解の3つの要の技術、造粒法、余熱法、溶解法は製品の品質レベルに応じて改造・調整が可能である。気中溶解技術のもたらす効果は省エネルギーだけではない。1つは溶炉サイズの大幅な減少であり、2番目は加熱源としてさまざまな設計が可能であること、そして3番目は原料の顆粒化による効果である。炉サイズの縮小により、炉建設コストの削減、素地替えの短時間化・低損失化、そして、一つの炉に一つの成形ラインが可能となり、生産調整も容易となる。廃炉時コストも削減される。さまざまな加熱源が使用できるため、難溶解性特殊ガラスの工業生産も可能となる。顆粒原料の使用は均質化の促進と品質の安定化に効果大であり、製品の歩留まりと品質向上に寄与する。将来のガラス産業においては、多品種少量生産が不可欠となり、短時間かつ低コストで生産ラインを建設したり、停止したり、廃棄したりといった切り替えが容易な製造システムの開発が必要と考えられる。現在、用途に合わせた気中溶解技術開発が産業界で進められており、製造システムとして採用されつつある。

## 2.2 プロセスシミュレータの開発

このような革新的ガラス溶融技術は、シミュレーション技術をベースにしたプロセスシミュレータの開発と合せて開発された。

ガラス溶融炉のシミュレーションは以前から行われてきたが、従来は「燃焼モデル」で燃焼室内の温度分布、ガスの流れや素地表面に与えるエネルギーを求めたり、「ガラス融液の熱流動モデル」で炉内のガラス

(a)「原料バッチ溶解モデル」計算結果



(b)「ガラス品質モデル」評価結果

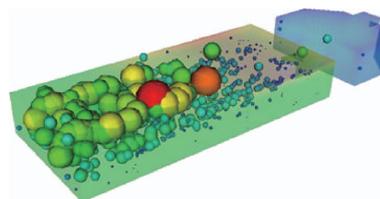


図3 ガラス溶融炉のプロセスシミュレータによるシミュレーション結果<sup>2)</sup>

融液の温度分布や流速分布などを計算したりするのが主であった。これに対し近年開発されつつあるのが、図3に示した原料の溶解や得られるガラスの品質を予測するモデルである。図3(a)は、これまで困難であった原料の溶解を「原料バッチ溶解モデル」で計算した結果の一例で、このモデルによれば原料がガラス化してガラス融液に溶け込む量を場所ごとに求めることが可能である。また、図3(b)は「ガラス品質モデル」で清澄剤の効果を評価した結果の一例で、気泡が成長、収縮する現象をシミュレートすることができる<sup>2)</sup>。これらのモデルでの計算結果を有効に活用することで、炉の構造やその操業条件をどのようにすれば原料を効率的に溶解し、品質の高いガラスを得ることができるかの予測が可能になる。

一方、このシミュレータは現行技術の向上にも有効である。現行のガラス溶融技術は、100年以上前に開発された技術を基にしているが、その主体をなす溶融炉はいわゆるブラックボックスであり、それをうまく操業し高品質のガラスを効率良く生産するには操業を行う人の能力に依存する勘と経験の要素が大きい面が有った。これを、補佐するのがシミュレーション技術で、炉の操業をデータに基づくシミュレーション結果を根拠に調整することが可能になる。また、最近種々の分野でIoT (Internet of Things) が注目され、ガラスの溶融技術についてもIoT化の促進が図られつつある。それにより集められたデータをビッグデータ解析すれば、これまでの見逃していた要因による品質の悪化を見いだすことができ、より効率的な操業が可

能になる。また、現在溶融炉の操業をエキスパートシステムと呼ばれる自動システムを導入することによって自動化することが一部で始まっている。操業を自動化することによって、人の能力に頼って炉を操業することによる適正条件からのズレによる品質の悪化やエネルギー効率の低下を防ぐことが可能になる。ただ、現在のエキスパートシステムは自動的に連続測定される限られた一部のパラメータのデータを基に条件の最適化が行われている。将来的には、IoTによって集められる多くのパラメータデータを基にAI技術を使って炉を操業することで、ガラスの生産をより効率化することも可能になると期待される。

### 3. ガラスの高強度化、薄板・軽量化

#### 3.1 ガラスの高強度化、軽量化

表示装置がCRTから液晶ディスプレイ(LCD)などの薄型ディスプレイに切り替わったことによって、それらのディスプレイを表示装置としたスマートフォンやタブレットなどのモバイル端末が爆発的に普及した。それとともにディスプレイのカバーに使用されているガラスに要求されたのが高強度化と薄板、軽量化である。ガラスの強化方法には主に物理強化と化学強化があり、物理強化は高温に加熱したガラスを急冷にする方法で建築用や自動車用に以前から広く用いられてきた。しかし、この方法はディスプレイ分野で使用される1mm程度以下の薄いガラスの強化には適用できず、そのようなガラスの強化が可能なのはガラスを炭酸カリウムなどの溶融塩に浸漬する化学強化である。この方法は、得られる強度がガラスの組成にも大きく依存するのでその組成開発と併せて行われ、化学強化に適した組成のガラスが以前から一部使用されており、モバイル端末の普及に伴ってその技術が飛躍的に向上した。特に化学強化することによって高い強度が得られる、アルミノシリケートと呼ばれる、成分に $Al_2O_3$ を多く含む組成のガラスは、モバイル端末の特殊な使用環境に適した組成や強化条件の適正化によって、落下や表面に傷がついても割れにくいものが使われるようになった。さらに、モバイル端末用途で広く普及した化学強化された高強度ガラスは、現在太陽電池用や自動車用への応用が検討され、一部に使用されるようになった。高強度化学強化ガラスを使用することにより、それまで未強化あるいは物理強化され使用されてきた2~3mmのガラスを1mm程度に薄くすることが可能で、薄型化や軽量化が可能になる。ただ、これらの用途ではディスプレイのカバーガラスよりほかに大型のものをより安価に製造する必要が有り、

広く普及するにはガラスの組成あるいは強化のプロセスの面での改良が必要である。

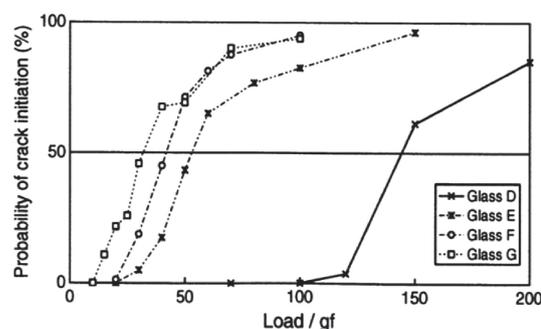
また、そのような特性の適正化には、これまで十分解明されたとはいえなかったガラス表面でのキズの発生やそれを起点とした破壊現象のメカニズムが、基礎的研究によってより明確になったことが大きく寄与している。例えば、図4(a)は種々の市販ガラスについてダイヤモンド製のVickers圧子を押し込んだ時のクラックの発生荷重を調べた結果で、ガラス組成によってクラックの発生のしやすさは非常に異なることがわかる。

また、図4(b)はこれらのガラスについて上記で測定したクラック発生荷重と、圧子圧入により生じた圧痕体積が熱処理によってどの程度回復したかを調べた結果で、この回復の割合が塑性流動と高密度化により生ずる圧痕内の高密度化の割合を示す。クラック発生荷重と高密度化の割合は非常に良い相関を示し、高密度化が起こりやすい組成ほどクラックは発生しにくいことがわかる<sup>3)</sup>。ガラスの強度は、表面でのクラックの発生のしやすさに大きく左右されるので、このような評価で高い強度が得やすいガラス組成がどのようなものかを知ることができる。

#### 3.2 新強化技術

この分野で、さらに高い強度を得る、あるいはこれまでの方法では難しい板厚で高い強度を得る方法とし

(a) 荷重とクラック発生確率の関係



(b) クラック発生荷重と圧痕回復度の関係

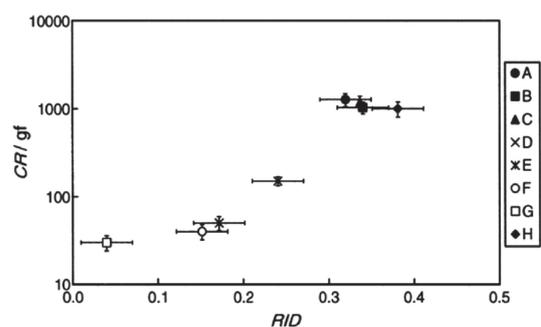


図4 ガラス組成とクラックの発生しやすさの関係評価結果<sup>3)</sup>

て開発されている技術にイオンビーム加工がある。この方法は、金属の加工では既に実用化されており、ガラスの加工においても表面の平坦化などの分野で実用化されつつある。これをガラスの高強度化に応用したのがIAT (Ion-Assisted Toughening) で、この方法によればこれまでの方法では強化が難しかった数100  $\mu\text{m}$  以下の非常に薄いガラスや結晶化ガラスでも強化が可能なが確認されている。この方法は真空プロセスを必要とするが、従来の強化法と比較し高温加熱を必要とせず室温でかつ短時間で強化できる点が特徴である<sup>4)</sup>。

### 3.3 超薄板ガラス

薄板ガラスとしてこれまでフロート法で生産されてきたものの厚さは、建築用ガラスと同組成のソーダライムガラスでは0.3mm程度が最も薄いものであったが、最近それより薄い0.2mm程度までのものがこの方法で生産が可能になっている。また、液晶ディスプレイ基板に使われている無アルカリガラスには、フロート法で生産されるものとダウンドロー法で生産されるものとがあり、この場合も最も薄いものでも0.3mm程度であったが、この無アルカリガラスを用いてダウンドロー法によればそれよりさらに薄い0.1mmあるいはそれ以下のものの生産が可能である。これらの薄板ガラスの用途はまだそれほど広いものではないが、非常に平滑で柔軟性に優れると共に、耐候性、耐熱性あるいはガスバリア性などの点で、プラスチックフィルムより非常に優れたガラス本来の特性を持っていることから、例えばフレキシブルディスプレイや有機EL照明の基板などへの用途開発が行われている。

## 4. これらの分野での海外の動向

海外に目を向けると、溶融技術の分野では、日本ではここで紹介した革新技術に重きを置いてきたのに対し、欧米では古くからの技術である排熱を用いたガラス溶融炉の省エネルギー技術に力を注いでおり、ビンガラス溶融炉では実用化済みの原料予熱設備の設置が拡大している。また、それに加え従来実用化が困難と考えられていた酸素燃焼窯での酸素予熱やTCR (Thermo-Chemical Regeneration「熱化学再生」、燃

料ガスの改質)<sup>5)</sup> など、新たな排熱回収技術の開発、実用化も行われている。また、高強度化の分野では欧米でも化学強化ガラスについて企業、大学・研究機関において研究、開発が行われているのは同様であるが、それ以外に米では Usable Glass Strength Coalition (USGC) と呼ばれる大学を含むコンソーシアムが、ガラス産業の共同体である GMIC (Glass Manufacturing Industry Council) を中心に設立され、ガラスの強度の向上を目標にガラス表面でどのようにクラックが生成するのかの基礎的研究から研究プログラムが開始されている<sup>6)</sup>。これらの分野での動向が注目される。

## 5. まとめ

ガラス分野のロードマップに基づく研究技術の動向について、簡単に紹介した。誌面の関係上、ここではガラス溶融技術の革新および現行技術の向上、ガラスの高強度化、薄板・軽量化の分野に絞ったが、これらの分野以外においても、二次電池の分野での全固体化を目指したイオン伝導性ガラス、発光材料を中心とした光学材料用ガラス、結晶化ガラス、光ファイバーの分野での更なる低損失化、高容量化など材料面での開発、あるいは最近ガラス材料の分析に使われるようになってきたシンクロトン光源を用いた構造解析など、種々の分野で多くの研究、開発が進められている。

### 文 献

- 1) NEDO 研究開発機構, “エネルギーイノベーションプログラム・革新的ガラス溶融プロセス技術開発プロジェクト成果報告書”, NEDO ホームページ (2013).
- 2) ニューガラスフォーラム, 溶融シミュレーション研究会 ホームページ.
- 3) Y. Kato et al., *J. Non-Cryst. Solids*, **356**, 1768-1773 (2010).
- 4) 田中修平, セラミックス, **50**, 950-952 (2015).
- 5) U. Iyoha et al., “Thermochemical regenerator systems proves itself at Pavisa”, *Glass International*, May, 29-30 (2015).
- 6) L. Mattos, *Amer. Cer. Soc. Bull.*, **91**, 22-29 (2012).

### 筆 者 紹 介

井上 悟 (いのうえ さとる)  
物質・材料研究機構 外部連携部門 学術連携室 室長.

長嶋 廉仁 (ながしま ゆきひと)  
日本板硝子(株) 研究開発部 特別研究員.