

## ガラス融液の流れ [Ⅱ]

日本電気硝子株式会社

長尾 向季

### Flow Pattern in Glass Melts [Ⅱ]

Hisatoshi Nagao

Senior Manager  
Research and Development Division  
Nippon Electric Glass Co., Ltd.

#### 4. ガラス融液の温度分布は S 字形になる。

多くのガラスの主成分はシリカやアルミナであり、耐火煉瓦もそれらの成分で作られているものが多いので、レンガと同じような色合いのガラスの熱伝導度はレンガと大きくは変わらないと想像できる。たとえば厚さ 1 m の煉瓦で作られた燃焼炉の内部を 1500°C に加熱すると、外面の温度は冷却の仕方にもよるがせいぜい数百度にしかならないだろう。これをガラス融液に例えると 1500°C でガラスを熔融しているとき深さ 1 m のガラス底面の温度が数百度にしかならないことになる。これではまともなガラスはできない筈である。現実にはガラス底面は充分高い温度になる。ガラス融液内では煉瓦より熱が遥かに伝わりやすく、伝導伝熱だけでなく輻射による熱の伝導が大きく寄与しているからである。輻射熱が熱媒体内で吸収・放射されて伝わるというメカニズムを解明するのにガラス融液は適切な媒体であって、ガラスの分野が輻射伝導理論の発展に寄与した最大のものの一

つと言われている。この理論によると輻射線（赤外線・熱線）はガラス融液を通り抜けやすく（レンガのばあいには散乱によって熱線の直進が妨げられる）、すなわちガラス表面（高温側の境界）では熱線がガラスを加熱せずに素通りするので、内部にいくにしたがってガラス温度は急激に下がる。また低温側の境界でも同様にガラスの温度は壁に近づくにしたがって、これもまた急激に下がる。壁から離れている融液の内部では輻射エネルギーはすべて吸収され再放射して、生じた輻射エネルギーは次々に伝わっていき、その結果ガラス融液はレンガよりも遙かに熱を伝えやすくなる。このメカニズムによりガラスは境界に近いほど急に温度が下がり、境界から充分離れた内部では温度の下がり方が小さく、ガラス表面から底面にかけて温度分布は S 字形となる。鉄分などの赤外線を吸収する成分が少ない（吸収係数が小さい）ガラスほど輻射伝熱の影響が強くなり S 字形となる度合いが強い。ガラスが狭い部分を潜り抜けることがある場合、たとえばスロート炉ではスロート内でガラスと壁の間が狭いのでガラスの温度は想像以上に低いということになる。一つのスロート炉で色調の異なるガラスを種々溶かす場合、ガラス底面の温度は黒っぽいガラスほど低

下するがスロート部ではその温度低下が特に著しい。この現象は頻繁に観察され、この特徴ある温度変化によってガラスの流れのパターンは溶解槽やスロート部でかなり変わってしまうと考えられている。この現象を理屈の上で明らかにするにはかなり正確な輻射伝熱モデルが必要になってくる。コーニング社の W. ジョンソンは温度分布や速度分布に及ぼす伝熱モデルの違いによる影響を調べた。(Radiation Heat Transfer Modeling, William W. Johnson, Corning Incorporated, VI. INTERNATIONAL SEMINAR on Mathematical Modeling and Advanced Numerical Methods in Furnace Design and Operation, p12) すなわち簡便な輻射伝熱モデルとより精密な輻射伝熱モデルを用いて溶解槽でのガラスの流れと温度分布を吸収係数が 10/m のガラスについて調べたところでは、より精密な輻射伝熱モデルを用いても“ロセランド近似”という簡便モデルを用いても結果に大差が無かったと報告している。この場合は溶解槽だけが調査対象で、ガラス融液の大部分は壁から十分に離れた場所に存在しておりガラスが狭い部分を流れているわけではない。また、この調査で用いたガラスの吸収係数というのが問題で、吸収係数が 10/m のガラスというのは 0.1 m の間で熱線の強さが  $1/e = 37\%$  に減少し、すなわち 10 cm 以内で輻射エネルギーの 63% が熱エネルギーに変わるガラスであるということである。このガラスの場合にたとえば格子間隔を 10 cm に採って数値シミュレーションを行うとロセランド近似という簡便な輻射伝熱モデルを用いても、かなり高い正確さで温度分布や速度分布が計算できるだろう。現実には吸収係数が 10/m よりも小さな“より透明度のよい”ガラスは多数出現しているし、今後も光学的な用途のガラスなどで増えていくだろう。赤外線に対して透明度のよいガラスの流れの調査に正確に対応出来るように、数値シミュレーションで使う伝熱モデルとしては(縮尺模型を用いた実験では輻射伝熱の特性を細かく再

現できるモデル流体をみつけるのが難しい。) 通常用いられているロセランド近似ではなく、より正確な輻射伝熱モデルを用いる必要がある。

## 5. ガラス融液に入った不均質ブツは製品に出て行きやすい。

流体の力学と狭義のニュートン力学「質点の力学」との違いの一つは、等加速度運動が実現されやすいかどうかということである。質点の運動というものを考えてみると、たとえば東京駅から 6.7 km 離れた品川駅を上りのひかり号が 115 km/hr で通過しているとき、ひかり号が東京駅に着くのは 7 分後であるらしいということは、計算ができる人なら直ちに答えられるであろう。ただし上の設問は条件不足で、新幹線は減速しながら走っており東京駅に着いた頃に速度がちょうど零になるような等加速度運動(等減速運動)を仮定するのが常識的である。新幹線という質点のかたまりは空気という流体の存在をものともせず、空気を押しのけて等加速度的に突き進む。(実際には空気抵抗を減らす努力が鋭意続けられているが。)しかし動くものが空気の場合にはそうはいかない。空気が空気を押しよけるのは結構むつかしく等加速度運動を仮定することは適切とは言えない。ガラス融液の動きもそうで、壁に向かって進んでいるガラスが壁に張付いているガラスを押しよけて直進するのはなかなか難しい。壁に向かう流体の流れが定常流であるとき流れの道筋はある断面で見ると流線群として描ける。[図 8]

壁と接する流線はただ一本だけで他の流線はすべて壁には到達せずに横へされる。壁にたどり着く流体は無限に薄い膜の上ののっており、その流れの量は無限に小さくまた壁にたどり着くまでの時間は限りなく永い。それゆえ定常流の場合にガラス融液はめったに壁に到達しないといえる。それを逆に考えれば、たとえば内張り煉瓦からの不均質物がガラス融液内に拡散してきた場合には、その不均質物は再び煉瓦壁に

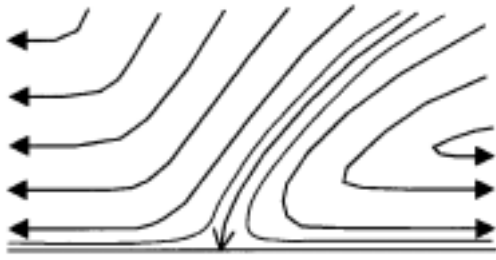


図8 壁に突き当たる流体は薄い膜の上に在り、その量は限りなく少ない。

付着することは無く、流れに乗って簡単に製品に流出することになる。

## 6. ガラスタンク窯はまぬけの当りくじか。

いつの世でも、もの作り“実践と経験”が理論よりも先行することが多い。今日ひろく行き渡っているガラスタンク炉の基本的な部分はシーメンス兄弟の発案と数多くの失敗と努力とに負っている。1860年にシーメンスの発案による最初の蓄熱式の商用オープンポット炉が鉛ガラスの溶解に応用された。高温になるのでシリカ含有量の多いガラスを溶かすことができ、プレス容器がより安く生産されたという。シーメンスはさらに連続溶解のスロート炉（スロートを空気で冷却し排気用の煙突がついている。）を開発し生産量の著しい向上や製品品位の向上を実現した。1884年にシーメンスは輻射加熱という考えを思いつき、それまで信じられていた“効率的な加熱とは加熱溶解されるものに直接炎を突き当てることである”という概念を克服した。この加熱方式の変更により、ガラス表面への均一な加熱ができバッチのキャリーオーバーや融液からの揮発量が減少することにより炉の長寿命化・製品品位の向上が一層実現できた。円形・半円形など様々の形状の炉が試され次第に長方形の炉に、また大形炉はサイドポート式、小型炉はエンドポート式の炉に集約されていった。当時は鉄鋼用の炉とガラス用の炉は

未分化で同時開発だったらしい。今日のスロート炉のデザインは1890年代にはほとんど固まっていたということである。（The advance of glass technology in the nineteenth century, M. Cable, ICG XIX, P121-130）1960年前後に日本の大学でガラス溶解窯についての調査が鋭意なされていて、炉内の燃焼、熱対流の役割、スロート内の流れ、電気溶解やバブリングの効果などの基礎調査が多く報告されている。[沢井郁太郎、神野博、高橋克明、成瀬省、井原将品等] 沢井郁太郎先生は当時のガラスタンク炉の状況について H. R. Voorhees が「一般に使われているガラスタンクは近代産業のひいた当りくじ“まぬけの当りくじ”の一つである。15%そこそこの熱効率で普通の品物しか造れず、10年前の最高水準をまだ超えられないのは義理にも近代工業の勝利だとはいえない。」と嘆いた話を紹介されながら、熱対流がガラスの熔融履歴をそろえ均質化の作用をすることなどから「ガラスタンクは少なくともまぬけの当りくじでない」と述べておられる。（窯協 66 [3] 1958）板ガラス炉ではガラスの流れと泡や素地ムラなどとの関連が理屈上よくつながるようである。（“熔融の経験から”近藤敬，1996年技術研修会）たとえば泡については、原料投入側のガラスは泡だらけであり、その泡が成形部側の流れに乗り移りやすいかどうかは、投入側側の循環流と成形部側の循環流との境界“ホットスプリング”の形状にかかわっている。すなわちホットスプリングの形が投入側側に傾いているとき、泡は投入側側の循環流から離れて浮上し成形部側の循環流に乗り移りやすいし、ホットスプリングの形が鉛直であるとき泡は成形部の循環流に乗り移りにくい。素地ムラについては板の表面と並行に多層膜状に入っておれば問題が生じにくいので、成形部近くのガラスの流れは乱れないことが大切である。「図9」さらに板ガラス炉でのホットスプリングの形と加熱冷却の仕方や炉形状との関連は理屈上よくつながり、またガラスの流れのパター

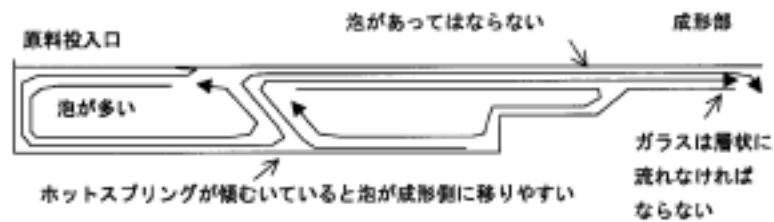


図9 板ガラス炉でのガラス融液の流れの模式図。

ンと省エネルギーとの関連もうまくつながる。

一方スロート炉では槽が複数存在するのでガラス融液の流れがある程度複雑になり、流れとガラス品位との関連がわかりづらい。それぞれの槽の役割が、それらの槽が本当に必要か、などを含めて決定的に解明されているとは言えない。たしかに今日のスロート炉では生産量の増大、熱効率の向上、生産品位の安定と向上、炉の長寿命化などが実現されているが、それらの改善は耐火煉瓦の発達、燃焼技術の向上、安定操炉のための制御装置や観測器具の開発など主にエンジニアリングの発展に負うところが大き

い。ガラス熔融のコンセプトとなると大きな進歩が達成できたとはいいいにくいのではないか。熔融コンセプトががあいまいなために中型や大型のスロート炉のデザインについては、いまだ揺らいでいるのではないだろうか。バッチ原料の溶解・脱泡・融液の均質化などの理論の確立がいまだ成らず、そうこうしている内に有害物質の不使用、エミッションの削減など環境上の要請などによりまったく新しい段階に突入し、従来ガラスの熔融の研究などが過去のテーマになってしまわないように熔融コンセプトの確立を急ぐ必要があるようである。