

フロートプロセスのコンピューターシミュレーション

旭硝子株式会社 中央研究所

上 堀 徹

Computer Simulation of Float Process

Toru KAMIHORI

Research Center, Asahi Glass Co.ltd.

1. はじめに

板ガラスの製造法としては、熔融スズ上に熔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よばれる連続プロセスが広く採用されている [1]。フロートプロセスの設備概要を図1に示す。フロートバスとよばれるスズ浴槽に流し込まれた熔融ガラスは、表面張力と重力とのバランスで決定される約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。

本稿では、フロートプロセスにおける現象とその特徴を概説し、各々の現象に関するコンピュータシミュレーションについて解析手法や解析結果を紹介する。

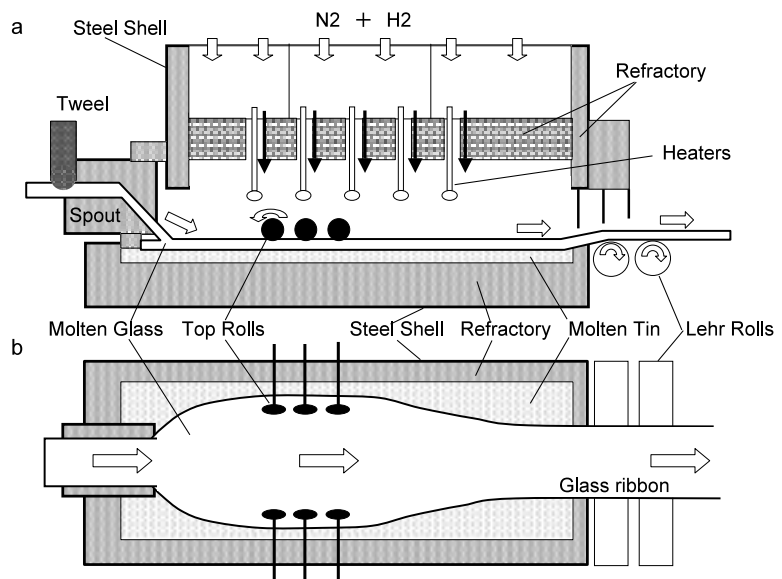


図1 フロートプロセスの設備概要
(a)フロートバス断面の模式図。(b)フロートバス平面の模式図。

旭硝子株式会社 中央研究所
TEL 045-503-7152
FAX 045-503-5179
Email: Tohru-kamihori@agc.co.jp

2. フロートプロセスにおける現象と特徴

ガラスの成形過程においては、粘性分布がその成形性に大きく影響を与える。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支配されるが、粘性が低くかつ熱容量が大きい熔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、熔融スズの流れは、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熔融スズ流れが相互に影響を及ぼし合っている[2, 3]。

また、熔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。図2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[1]。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、ガラスや熔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[4, 5]。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[5]。図3にガラスの成形、温度場、熔融スズ流れ、およびガス流れの相互の関係を模式的に示す。

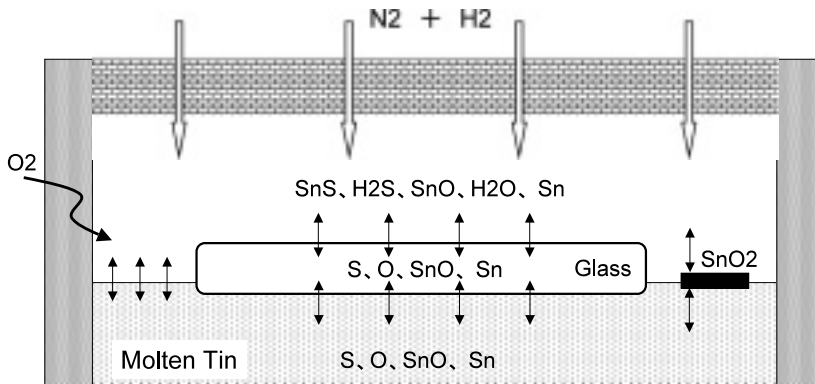


図2 フロートバス内のスズおよび不純物（酸素、硫黄）の輪廻の模式図

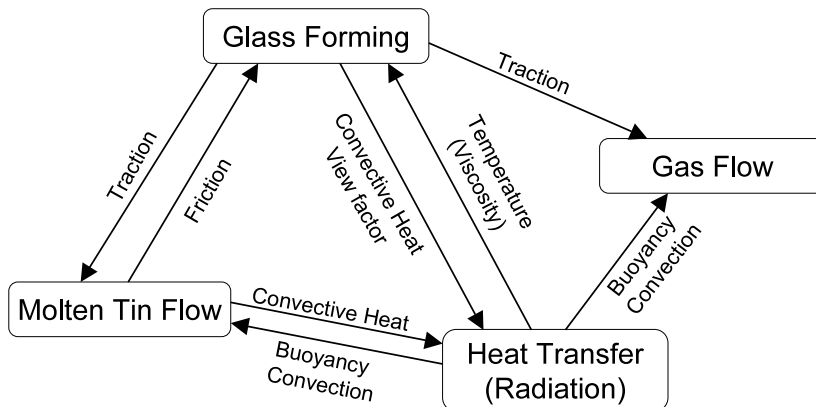


図3 フロートプロセスにおける各現象（ガラスの成形、温度場、熔融スズ流れ、ガス流れ）の相関関係

ガラスの成形，溶融スズ流れ，温度場，ガス流れのシミュレーションを，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，フロートプロセス全体をシミュレートすることができる。

3. 成形シミュレーション

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よばれるように巾や長さ比べて厚さが非常に薄いため，浅水近似とよ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 [6]。主な入力データはガラスの流量，温度分布，引き出し速度，トップロールの位置と速度であり，出力データはガラスの速度分布，厚さ分布，シェイプ（ガラスリボンのエッジの形状）である。ガラスの温度分布は，上述したようにカップリングの対象である。図 4，図 5 に成形シミュレーションの解析例を示す。前者はフロートバス内の厚さ分布とシェイプの解析結果であり，後者はフロートバス出口の中方向の厚さ分布の解析結果である。

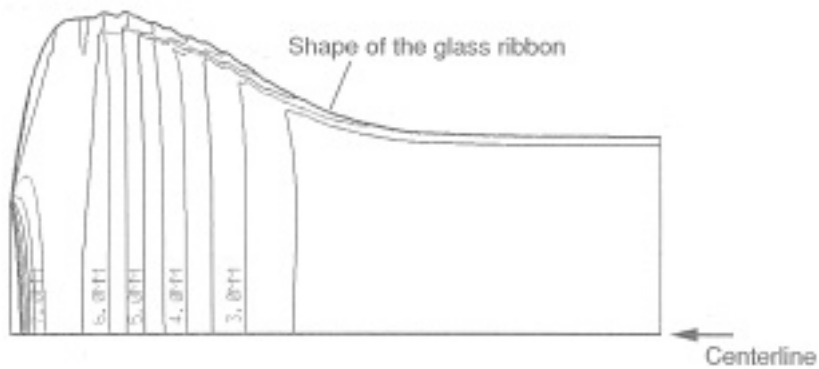


図 4 成形シミュレーションの解析例：フロートバス内のガラスの厚さ分布とシェイプ。

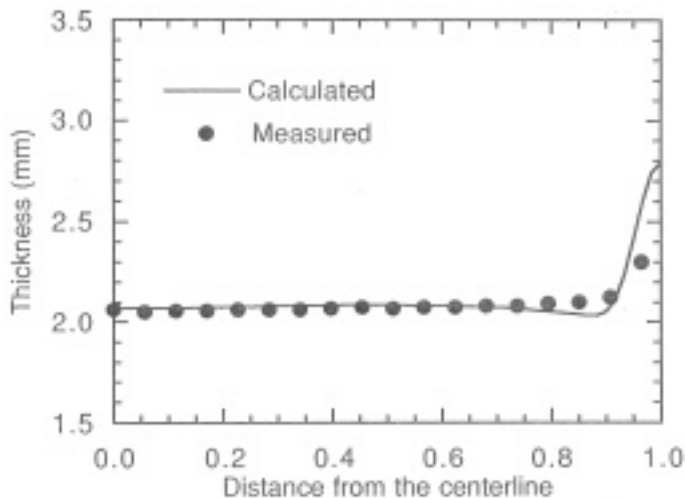


図 5 成形シミュレーションの解析例：フロートバス出口の中方向の厚さ分布。中方向の距離は正規化されている。

4. スズ流れシミュレーション

フロートバス内のスズ浴は、巾や長さに比べて厚さが非常に薄いが、流れが3次元的な乱流となるため、ガラス成形シミュレーション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 [2, 3, 7]。主な入力データはガラ

スの速度分布、温度分布、シェイプ、外気への総括熱伝達係数であり、出力データは熔融スズの速度分布と温度分布である。図6にスズ流れシミュレーションの解析例を示す。ガラスの下部のスズはガラスに引きずられて下流に流れ、ガラスに覆われていない部分のスズは上流に流れながら徐々にガラスの下部にもぐり込むこと、スズの流れを制御する目的で使用されるティンバリアーはスズの流れを効果的にせき止め、スズはその下流で大きな渦を形成することがわかる。

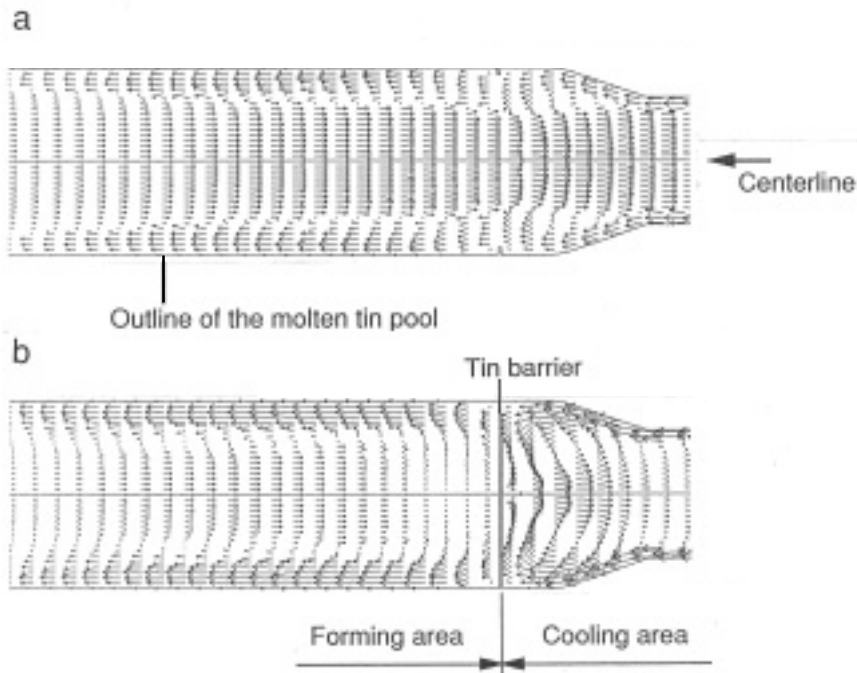


図6 スズ流れシミュレーションの解析例：成形域下流のスズの流速ベクトル。
 (a)スズ浴の上面近傍水平面内の流速ベクトル。
 (b)スズ浴の下面近傍水平面内の流速ベクトル。ガラスは左から右へ流れる。

5. 温度場シミュレーション

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臓物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、計算機負荷の大きな解析が必要となる [2, 3]。主な入力データはガラスの速度分布と厚さ分布、シェイプ、スズの速度分布、ヒーター入熱分布、クーラー脱熱量であり、主な出力データはガラスの温度分布、スズの温度分布、内壁面温度分布である。図7、図8に温度

場シミュレーションの解析例を示す。前者はガラスの流れ方向の温度分布であり、後者はガラスの中方向の温度分布である。ガラスはティンバリアーの下流で急冷却されていることがわか

る。また、図9に解析結果から得られた熱の授受関係を示す。フロントバス内の熱移動の状態を定量的に把握することができ、温度分布の決定メカニズムを理解することができる。

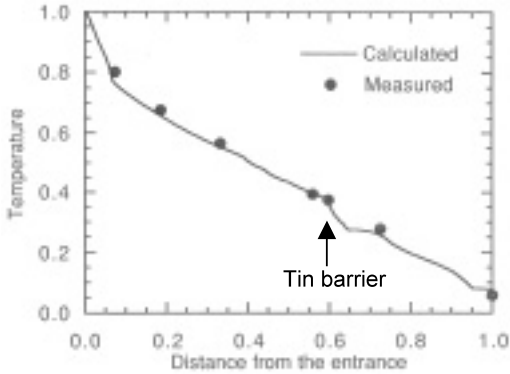


図7 温度場シミュレーションの解析例：リボン中央位置の流れ方向の温度分布。温度と距離は正規化されている。

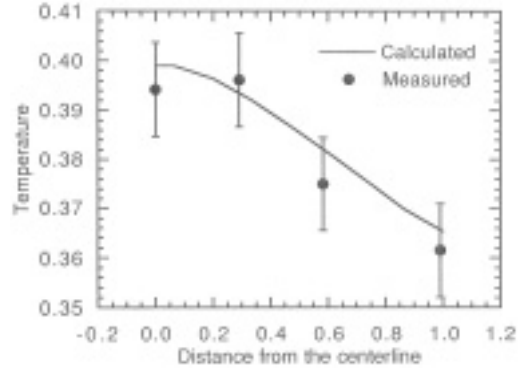


図8 温度場シミュレーションの解析例：バス入口から距離 0.56 の位置におけるガラスの中方向の温度分布。温度と距離は正規化されている。

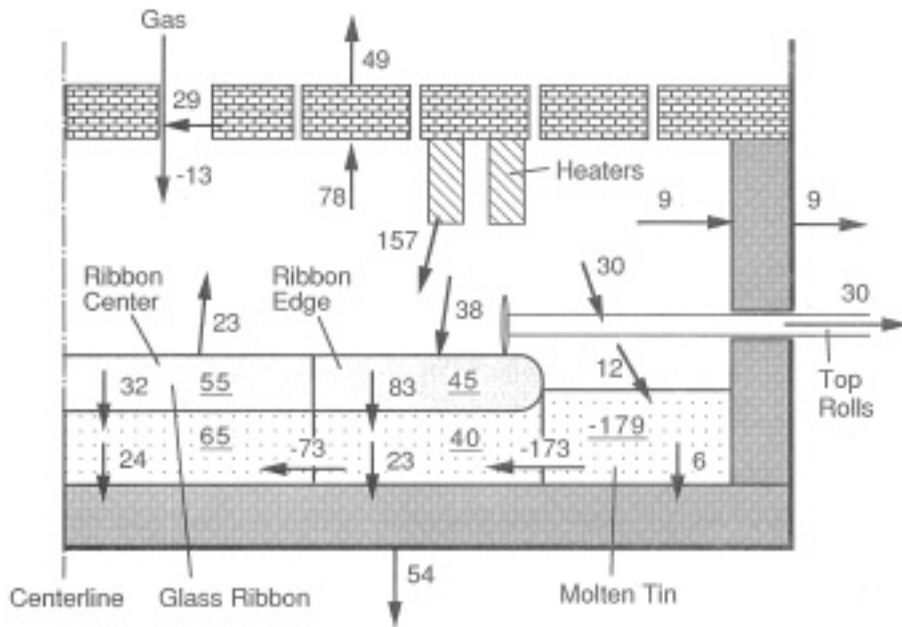


図9 成形域下流における熱の授受関係 矢印は熱移動の方向を示し、下線を付した数字は流れ方向の顕熱を示す。数字はガラスの顕熱を100%として正規化されており、%で表されている。

6. ガス流れシミュレーション

フロン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[5]。主な入力デー

タはガラスの速度分布、温度分布、内壁面の温度分布、バス内に導入されるガスの流量分布、バス外に排気されるガスの流量分布であり、出力データはガスの速度分布、温度分布である。

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。図10、図11はガス流れシミュレーションの解析例であり、ガスの速度分布とガラスで覆われていないスズ上面から不純物を揮散さ

せた場合の濃度分布を示す。揮散した不純物は、リボンの直上面を巾方向に中央部へ向かう流れにのり、さらに流れ方向の対流にもってバス内全域に広がるのがわかる。

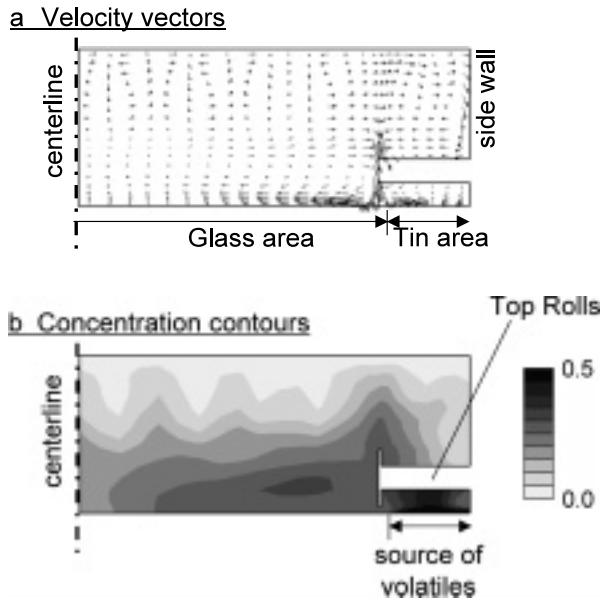


図10 ガス流れシミュレーションの解析例：トップロールを含む横断面内のガス流れの(a)流速ベクトルと(b)不純物の濃度分布。濃度は正規化されている。

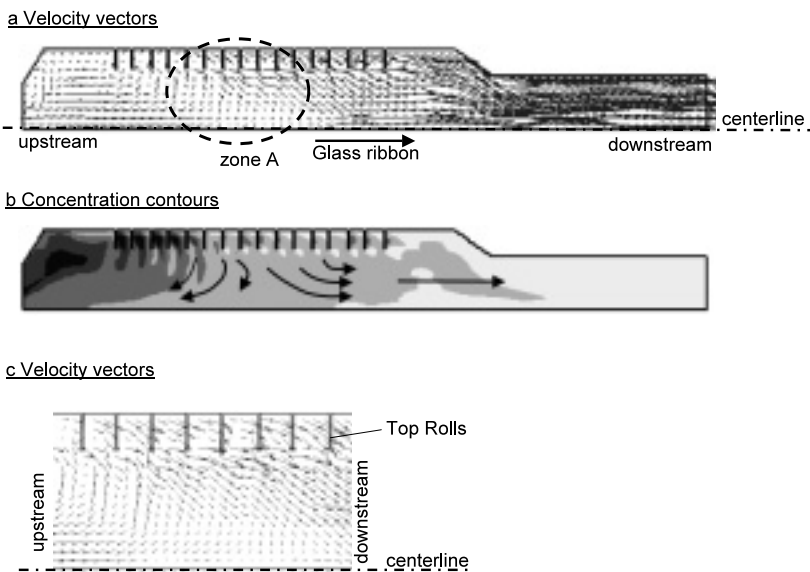


図11 ガス流れシミュレーションの解析例：トップロールを含む水平面内の (a)ガスの流速ベクトル、(b)不純物の濃度分布、(c)ZoneAの拡大図。濃度は正規化されている。

7. おわりに

コンピュータシミュレーションは、フロートプロセスの現象を本質的かつ定量的に把握するための有力なツールであり、操作条件の最適化や品質改善あるいは設備設計の指針を得るために日常的に活用されている。今後、シミュレーション技術のさらなる進化が図られ、フロートプロセスの進化発展にますます貢献することを期待したい。

参考文献

- [1] L. A. B. Pilkington: "The float glass process", Proc. Roy. Soc. Lond. A. 314, 1-25 (1969).
- [2] T. Kamihori, M. Iga, S. Kakihara & H. Mase: "An integrated mathematical model of float process", J. Non-Crystalline Solids 177 (1994) 363-371.
- [3] T. Kamihori, M. Iga, S. Kakihara, R. Akagi, & H. Mase: "An integrated mathematical model of float process", Reports of the Research Laboratory, Asahi Glass Co., Ltd. 45 (1995) 15-28.
- [4] Charlene A. Falleroni: "Controlling Top Surface Defects in Float Glass", CERAMIC INDUSTRY DECEMBER 1995, 31-35.
- [5] Nobuyuki Ban, Toru Kamihori, Hiroshi Takamuku: "A study of the behavior of volatiles in the float process", J. Non-crystalline Solids 345&346 (2004) 777-781.
- [6] 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 (1991) 577-579.
- [7] 上堀 徹, 伊賀元一, 齊藤恒洋: "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 (1999-7) 187-188.