特 集 革新的ガラス溶融プロセス技術

気中溶解試験炉のシミュレーション

(一社) ニューガラスフォーラム

川地 伸治

Simulation of in-flight melting furnace

Shinji Kawachi

New Glass Forum

1. はじめに

気中溶解炉の開発を支援するため、ハードウ エアの実験研究に並行して、種々のガラス溶解 現象を記述するシミュレーション・ソフトウエ ア GICFLOW を開発してきた。東洋ガラス社 に完成した試験小型炉(日産1トン)を対象と して GICFLOW による解析を行い、ソフトウ エアの検証を行うとともに試験炉の技術的特徴 を明らかにした。

2. シミュレーション

- 2.1 解析対象モデル
- (1) 燃焼室

燃焼室は図1に示すように、バーナー部、燃
焼室、タックストーン、排気塔、炉内観測用領
域の5つの領域で構成される。

燃焼室は1200×1000×470, 排気塔は120× 720×871[mm]の直方領域であり, それぞれ

⊤

TEL

FAX

E-mail:kawachi@ngf.or.jp





1535×750×175[mm]のタックストーン領域に 接続する。また,炉内観測用として,230×310 ×470[mm]の領域を炉の両脇に設けている。 (燃焼室が拡張されたような形状となってい る)バーナーは1次燃料投入口,2次燃料投入 口,1次酸素投入口,2次酸素投入口,原料搬 送用酸素投入口で構成される。

(2) 溶解槽

溶融槽の全体図を図2に示す。溶融槽は1000 ×750×325[mm]の溶解槽と460×325×325 [mm]および400×350×150[mm]のフィーダ ー接続部A,Bで構成される。溶解槽とフィー ダー接続部Aの上面が燃焼室と接続する。



図2 溶解槽の全体図

2.2 解析条件

(1) 燃焼室

燃料と酸素の供給量は、1次燃料 6.0[Nm³/ hr],2次燃料 3.5[Nm³/hr],1次酸素 13.6 [Nm³/hr],2次酸素 8.1[Nm³/hr],原料搬送 用酸素 13.8[Nm³/hr]であり,過剰酸素比は 1.6 とする。

投入原料はバッチとカレットの混合原料であ り,投入量はバッチ41.5[kg/hr],カレット 41.5[kg/hr]である。バッチのガラス化率を 0.85とすると,試験炉のガラス引上量は76.8 [kg/hr]となる。

また、本解析はバーナーの入口条件が非常に 高流速であり、計算が不安定になりやすい。安 定した計算を行うためには、タイムステップは 十分小さくする必要があるが計算時間は膨大と なる。そこで、解を現実的な時間で得るため、 以下に示すような3段階に分けた計算を行う。

ステップ1:0~10000 ステップ (燃焼計算)

ステップ2:10000~30000 ステップ (燃焼計算) ステップ3:30000~35000 ステップ

(気中溶解計算)

(2) 溶解槽

溶融槽の境界面を図3に示す。バーナー直下 に100×100[mm]の暫定的な流入面を設けてい るが、実際の計算では気中溶解計算の結果から 得られる流量分布に従って流入流速は決定され る。溶解槽およびフィーダー接続部Aの上面 は熱束連成面とし、燃焼室からの熱束を境界条



件とする。炉壁および炉底は熱束固定面であ る。また、フィーダー部の加熱の影響を模擬す るため、フィーダー接続部 B の上面は温度固 定とする。

2.3 解析結果

(1) 燃焼室

図4~図5は、気中溶解時の炉内温度分布と 炉内流速ベクトルを示している。原料を投入し ない場合と比較して、火炎部の温度が下がって いる様子を確認することができる。また、図6 ~図7は原料加熱の様子を示している。230[℃] に予熱された原料は、投入から距離にして0.3 [m]、時間にして30[ms]程度で昇温が完了 し、その温度は約2000[℃]に達する。

以上に示した気中溶解計算の結果は、物理的 にも経験的にも傾向としては概ね妥当であると 考えられる。ただし、着地原料の温度(平均値) は、後述する溶融槽の実測温度に照らし合わせ ると温度が高い印象を受ける。ただし、溶解槽 の表面は泡層で覆われるという炉内観察結果が あり、原料が泡層を通過する際の温度低下を考 慮すれば妥当な値であると判断した。



図4 炉内温度分布図



図5 炉内流速ベクトル



図6 原料加熱の状況



(2) 溶解槽

熱流束分布と流入分布を連成条件として,溶 融槽の熱流動計算を実施する。溶融槽表面を図 8に示す。溶解槽の液面を見ると,バーナー直



図9 溶解槽の流れ場

下を中心とした円形状の高温領域が存在し, 燃 焼室から熱束の影響を受けていることがわか る。

また,図9は溶融槽の流れ場を示している。 溶解槽液面では,バーナー直下の領域でガラス 化された高温の原料が降り注ぐため,中心から 壁面に向かう対流が形成される。

2.4 熱精算

試験炉全体の熱収支について,実測データと 解析結果との比較い,その結果を表1~表2に 示す。

入熱においては、差異は約2[%]でほぼ一致 していると言える。解析値が若干高めに評価さ れる要因としては、各ステップにおける反応熱 の最大値を使用しているためと考えられる。出 熱においても、実測との差異は最大でも+3.9 [%]となっており、高い精度で一致している。

表1 東洋試験炉熱清算(入熱)

	実測値	解析值	羊卑[%]
	[kcal/hr]	[kcal/hr]	
燃料発熱量	83,642	85,576	+2.3
原料持込み熱量	3,116	3,116	0.0
合計	86,758	88,692	+2.2

	実測値	解析值	羊毘[0/]
	[kcal/hr]	[kcal/hr]	左共[70]
炉壁損失	28,188	29,298	+3.9
ガラス化反応熱	3,951	4,006	+1.4
排ガス損失	16,597	16,128	-2.8
ガラス持出熱	38,021	39,260	+3.3
合計	86,758	88,692	+2.2

表2 東洋試験炉熱清算(出熱)

また,出熱の内訳は炉壁損失33[%],ガラ ス化反応熱5[%],排ガス持出熱18[%],溶融 ガラス持出熱44[%]と経験的に予測される数 値の範囲内といえる。

2.5 泡層評価

気中溶解プロセスでは,火炎中で加熱された ガラス原料が融液表面に到達したとき泡層とな ってガラス融液表面を覆う現象が観察された。 この泡層は無数の気泡が積み重なって存在する ために形成される。燃焼室の輻射熱は泡層内部 の気泡によって散乱し,ガラス融液内部への伝 熱を遮り,泡層下部の融液温度の低下,ひいて は溶解効率を大きく悪化させる。

そこで,気中溶解技術の普及に伴い,泡層生成のメカニズムの解明と泡層形状の予測が重要であると判断し,泡層に関する定式化を行ったうえで形成される泡層形状のシミュレーションを実施した。結果を図10に示す。シミュレーションの結果は,高さ20[cm]程度の高原状で,バーナーの直下は燃焼ガスの圧力によりカルデラのような形状となる。それらは,すべて



図10 泡層の生成シミュレーション

炉内観察の報告と一致しており,泡層生成のシ ミュレーションが妥当であると判断できる。

3. まとめ

GICFLOW には、これまで述べた解析以外 にも図 11 に示すように種々の溶解現象を解析 する機能が組み込まれている。

これらの解析機能は気中溶解炉だけでなく, ガラス業界で一般に使われているシーメンス炉 にも適用可能である。ニューガラスフォーラム では,2008年より溶融シミュレーション研修 会という組織を作り,ガラス企業や大学にソフ トウエアを提供してきた。

ガラスの基礎的研究とシミュレーション・プ ログラムを並行して活用することにより,自然 現象の理解とソフトウエアの深化が一層進むも のと期待される。



図11 GICFLOW を構成する種々のモデル群