

燃焼～溶融の CAE による機能性評価と 感度調整による試作レス開発プロセスの 確立[†]

小西洋平，武村直輝，中野史康，齊藤卓一

Establishment of a Prototype-less Development Process by Functionality Evaluation and Sensitivity Setting using Numerical Simulation for Combustion to Melt

Yohei KONISHI, Naoki TAKEMURA, Fumiyasu NAKANO and Takuichi SAITO

生産本部技術統括部製造部では半導体露光装置や FPD 露光装置に使用される高純度合成石英ガラスを製造している。石英ガラス合成は燃焼～溶融といった複雑反応を伴うため、炉内状態の計測や予測が難しい。このため従来はプロセス条件変更による品質、生産性向上のために、複数回の実機による試作～品質確認が必須であり、膨大な開発コストの発生と量産安定性に課題があった。本報では、課題解決のため、実機試作レス開発プロセスを確立したので報告する。

網羅的な機能性評価を行うため、実験は数値シミュレーション (CAE) を用いて行った。CAE を用いた二段階設計を実現するため、まずプロセス機能展開によるシステム全体の俯瞰に取り組んだ。プロセス機能展開は机上で複数の技術者によって行い、プロセス機能展開表としてシステムの見える化をすることができた。ここから抽出された制御因子や誤差因子をとりあげ、CAE を用いて網羅的に評価することで、CAE による二段階設計を実現した。従来の開発で必要だった実機実験を CAE で代替したことによって、信頼性の高いプロセス条件を短期間で確立することができ、生産性向上を達成した。

Production Department Technology Sector Production Technology Division manufactures high-purity synthetic silica glass used in semiconductor lithography system and flat panel display (FPD) lithography system. Silica glass synthesis involves complicated reactions such as combustion and melting, so it is difficult to measure and predict the state inside the furnace. For this reason, in the past, to improve quality and productivity by changing process conditions, it was essential to perform trial production and quality confirmation with actual machines multiple times, which caused enormous development costs and problems in mass production stability. In this study, we have established an actual prototype-less development process to solve the problem.

Experiments were conducted using computer-aided engineering (CAE) for comprehensive functional evaluation. To achieve a two-step optimization using CAE, we first worked on a bird's-eye view of the entire system by process-function deploying. The process-function deploying was performed by multiple engineers on the desk, and the system could be visualized as a process function deployment table. By taking up the control factors and error factors extracted from this and comprehensively evaluating them using CAE, we achieved a two-step optimization by CAE. By substituting CAE for the actual machine experiment required in the conventional development, highly reliable process conditions could be established in a short period of time, and productivity was improved.

Key words CAE, 熱流体解析, 品質工学, 二段階設計, 合成石英ガラス
CAE, Thermo-fluid analysis, Quality engineering, Two-step optimization, Synthetic silica glass

1 はじめに

高純度石英ガラス合成プロセスの生産効率を向上させることを目的に、数値シミュレーション (CAE) を応用した

網羅的かつ効率的な技術開発プロセスを確立したため、報告する。

本論文では、まず石英ガラス合成における火炎燃焼～ガラス溶融の各過程を工程における機能として定義した。ブ

[†] 本稿は引用文献 [6] に、新たに6.3新規合成炉の開発状況を加えたものである。

プロセス機能展開の手法によりプロセス全体を俯瞰しCAEで直積実験を行うことで、機能性に関する要因効果図を獲得した。さらにCAEでL₁₈実験によって制御因子の感度への効果を評価した。この結果得られたロバスト・エンジニアリング情報（RE情報）を用いて実生産炉の運転条件を設定することにより、試作レスで良品を獲得し、本開発プロセスの信頼性の高さを示した [1], [2].

2 背景

2.1. 合成プロセスの説明

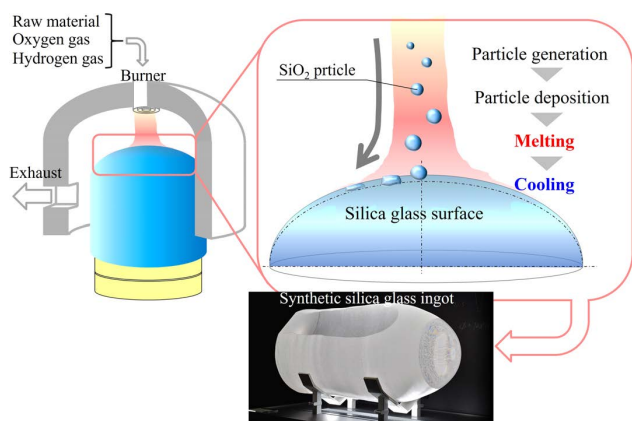


Fig. 1 石英ガラス合成模式図及び石英ガラスインゴット

当社では直接法により光学用途合成石英ガラスを製造している。直接法石英ガラスでは、バーナーから酸素、水素といった燃焼ガスと、原料となる塩化ケイ素ガスを供給することで、火炎を形成し、火炎中の化学反応によりシリカ微粒子を生成する。生成されたシリカ微粒子を石英ガラス表面に堆積させながら、バーナー火炎によって堆積物を加熱溶融することで高純度な石英ガラス塊（インゴット）を得ることができる (Fig. 1).

合成中の石英ガラス表面は高温にさらされることで溶融し、インゴット外周側にガラスが流れて広がる過程を経て低温となり固化する。この石英ガラスの溶融から冷却までの過程によって石英ガラスの光学的品質は変化するため、合成中の炉内環境を一定に保つことが品質の安定性に対して重要である。一方で周囲環境の様々な変動により、合成中の石英ガラス周囲の温度場、ガス濃度場が絶えず変化するので、これらの変動に対して石英ガラスの品質を変動させにくい炉内構造設計、合成条件が求められる。

我々は石英ガラスの歩留まりを改善させるため、取得する石英ガラス部品の品質を変更せずに合成するインゴットを小型化することによって、合成にかかるリードタイム (L/T) 短縮、廃棄されるガラス重量の最小化に取り組んだ。

2.2. 課題

石英ガラス合成炉内では、火炎中の加水分解反応、粒子堆積、溶融、冷却といった現象が同時に起きており、かつ炉内での合成期間が長い為、以下の課題を抱えていた。

- ①炉内状態の把握、評価が難しい。
- ②操業中の条件変更による実験のコストが高く、再現性のある条件改良検討が難しい。
- ③インゴットのサイズを変更しつつ、同じ品質の部品を作製することが難しい。

そこで、石英ガラス品質を維持しつつインゴットサイズを変更するための合成条件設計のため、CAEを用いた機能性評価プロセス開発を試みた。

3 対策－評価の進め方

3.1. プロセス機能展開とシステム分割

炉内燃焼の網羅的な把握に向けて、システムの機能を明確にするため、まずプロセス機能展開を行った。複数の技術者による協議を行った上で、石英ガラス合成炉及び周辺設備・環境に関わるパラメーターを抽出し、プロセス機能展開表にまとめた。プロセス機能展開を行った結果、炉に関わる各パラメーターはいくつかの補助的な機能（サブシステム）に分けて整理できることが分かった。

3.2. サブシステムの機能とシステム範囲

石英ガラス合成システムに付随するサブシステムの機能として、我々は、①原料供給、②粒子合成、③粒子堆積、④溶融、⑤冷却、の5つの機能に分割して考えた。それぞれのサブシステムの工程における機能を、

- ①原料供給：
設定供給量に対して常に安定した供給量にする。
- ②粒子合成：
火炎中で生成されるシリカ粒子の粒子径分布を常に一定にする。
- ③粒子堆積：
堆積するシリカ微粒子の堆積量が石英ガラス表面の位置ごとのシリカ微粒子堆積量分布を一定にする。
- ④溶融、⑤冷却：
堆積によって生成した石英ガラスの表面に与えられる熱量の分布を時間的に常に一定とする。

とそれぞれ定義した。石英ガラス合成システムに付随する制御因子（設計パラメーター及び操業パラメーター）は、一つのパラメーターが複数のサブシステムの機能に影響していると考えられる。例えばバーナーを通じて火炎の温度をコントロールすることができるが、これによって②粒子合成、③粒子堆積、④溶融、⑤冷却、の各サブシステムに対してそれぞれ別種の変化を与えると予想できる。このため、パラメーターを変化させた際の個別のサブシステムご

との評価を行うのではなく、システム全体を一つの実験で総合的に評価する必要があると判断した。

3.3. 機能の定義と評価指標

今回のシステムの評価指標と機能について検討を行った。合成中の石英ガラス表面では、中心部分の温度が高い領域でガラスが溶融し、溶融したガラスが周辺部へと流動して広がっていく過程で冷却され、固化する。よって、合成される石英ガラスの状態を一定にするためには、溶融～流動～冷却の過程に生じる温度変化のばらつきを評価しなければならない。

しかし、高温酸性ガス環境である実生産炉内でガラスの流動速度変化や、それに伴う温度変化を時間とともに観測することは困難である。そこでCAEによる評価を検討した。CAEを適用した場合の問題は、高温のガラスの流動が長時間にわたる非定常的な現象であるため、計算負荷が高いことであった。ただし、石英ガラスの溶融～流動～冷却による固化の過程は、いずれも温度変化によって制御される過程である。つまり、ガラス表面に加わる熱エネルギー収支（熱流束）の変動を評価できれば、非定常性を直接表現しないまでも、ガラス流動の変動に対する代替指標として適用できると考えた [3]。

3.4. 予備実験による評価部位の確認

予備実験として、石英ガラス表面の熱流束分布を変化させた条件下でのCAE及び実際の石英ガラス合成の小規模実験を行い、評価の妥当性検証を行った。

バーナーに供給するガス流量、流速を変化させて、熱流束を変更した条件（条件1、2、Fig. 2）を設定した。CAE解析から、条件1では熱流束の大きい領域が石英ガラスインゴット表面の右側に偏っているのに対して、条件2では中心付近にあることがわかる。熱流束が小さい領域では、ガラスの流動速度が遅くなり、熱流束が大きい領域ではガラスの流動速度が速くなるため、条件2で合成したガラスインゴットは回転対称な形状を維持し、条件1では回転対称形状を維持できないと予想される。

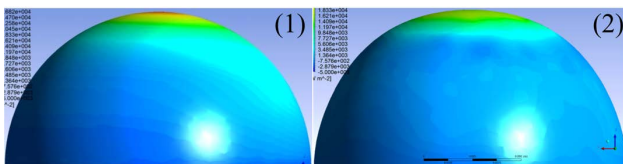


Fig. 2 石英ガラス表面の熱流束分布図 (CAE)
(1) 条件1, (2) 条件2

実際に合成したインゴットの合成中の様子を比較すると (Fig. 3), 条件1では熱流束が大きい側のガラスが流動によって片減りして、回転対称な形状を維持できないことが確認された。

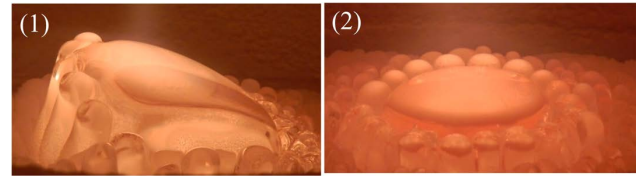


Fig. 3 各テスト条件で合成された石英ガラスインゴット
(1) 条件1, (2) 条件2

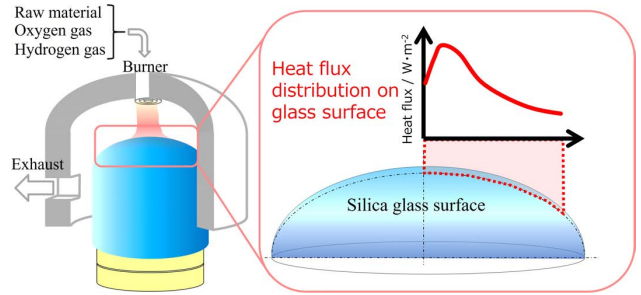


Fig. 4 石英ガラス表面熱流束分布評価の模式図

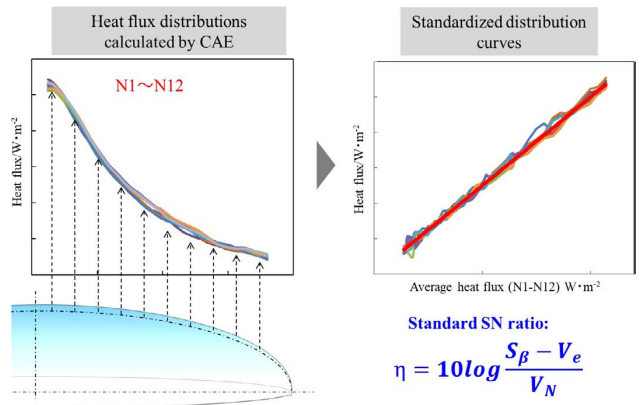


Fig. 5 基本機能（熱流束分布）と標準 SN 比評価の模式図

合成されたインゴットの品質悪化の主な原因は合成中のインゴット表面でのガラス流動の不均一であるから、以上の予備実験より、CAE解析で得られる石英ガラス表面の位置ごとの熱流束の分布（中心：高い、周辺低い、Fig. 4）を評価することが必要と判断した。

そこで合成中の石英ガラス表面の中心からの位置を信号とし、シミュレーションによって算出される各位置の熱流束を出力とし、各位置における熱流束の誤差に対する安定性を評価することにした (Fig. 5)。

3.5. CAEによる実験方法

実験はCAE解析ソフト中に作製したシミュレーションモデルにより行った。シミュレーションモデルは、実物の設置寸法、壁面及び各ガス種の物性値を境界条件として数値化し、有限要素法による数値計算を行った。

モデル上で直交表に対応してCAEの境界条件を変更させるため、解析ソフトと自動最適化用ソフトを連動させることで、CAEによって自動で直積実験を実行することができた。

3.6. 誤差因子と水準

CAE の実験はばらつきを持たないため、誤差因子についてはプロセス機能展開表から実際のプロセス変動に関する 11 因子を抽出した。実際に起こりうる製造条件の変動幅を、仮想的な誤差として L_{12} 外側直交表に割り付け、実生産炉におけるプロセス変動を再現することにした [4], [5]。

3.7. SN 比算出方法

CAE で得られた熱流束分布は各実験行の平均値に対する値のばらつきを標準 SN 比として評価した。標準 SN 比は

$$\eta = 10 \log \frac{S_{\beta} - V_{\epsilon}}{V_N} \quad (1)$$

式で算出した。Fig. 5 に CAE で得られた 1 行分 (12 サンプル) の熱流束分布曲線と、各位置における熱流束の平均値を標準条件 (N_0) として、標準条件の出力を信号 (横軸) にしたグラフの例を示す。

4 CAE による機能性評価結果

4.1. 制御因子の決定

制御因子はプロセス機能展開表を基に、各サブシステムに属する制御因子から 46 因子を取り上げ、二つの L_{36} 内側直交表にそれぞれ 23 因子ずつ割り付けた。誤差因子は先に取り上げた 11 因子を L_{12} 外側直交表に割り付け、2 回の $L_{36} \times L_{12}$ の直積実験を CAE で行った。実験リードタイム短縮の観点から、二つの直交表を並行して計算させることを考えた。プロセス機能展開表にあるすべての因子を公平に評価するため、二つの直交表の間で誤差因子を共通とすることにした。

4.2. 実験結果

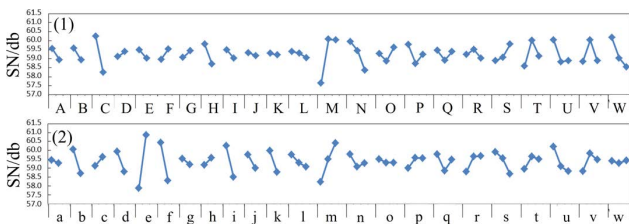


Fig. 6 要因効果図 (標準 SN 比)
(1) 1 バッチ目, (2) 2 バッチ目

得られた 2 回分の $L_{36} \times L_{12}$ 実験の要因効果図を示す (Fig. 6)。

得られた要因効果図の最適条件と比較条件の確認実験を行い、利得の再現性を確認した (Table 1)。Table 1 の確認実験の利得から、今回の 1 度目と 2 度目の実験ともに利得の再現性が得られていると判断した。

Table 1 確認実験結果

	1 st batch/db			2 nd batch/db		
	Best	Comparison	Gain	Best	Comparison	Gain
Estimated	70.8	58.5	12.3	68.5	62.6	5.9
Confirmation experiment	70.2	59.3	10.9	69.4	61.5	7.9

5 CAE による感度情報の獲得と調整

5.1. 理想熱流束分布の定義

$L_{36} \times L_{12}$ 実験で得られた要因効果図から、SN 比に効果が大きい因子と効果の小さい因子があることがわかった。SN 比への効果が大きい因子は、操業上 SN 比が高くなる水準に固定すべきなのに対し、効果が小さい因子は目的を最大化するための感度調整に適用できると考えた。次にこの感度調整因子を用いた感度調整方法について検討した。

3.4 節で述べたように、合成中の石英ガラス形状を維持するためには、熱流束分布を適切な状態に保つ必要がある。そこで着目しているインゴットを小型化した場合の石英ガラス表面の熱流束分布を CAE で調査したところ、Fig. 7 のようになることが分かった。

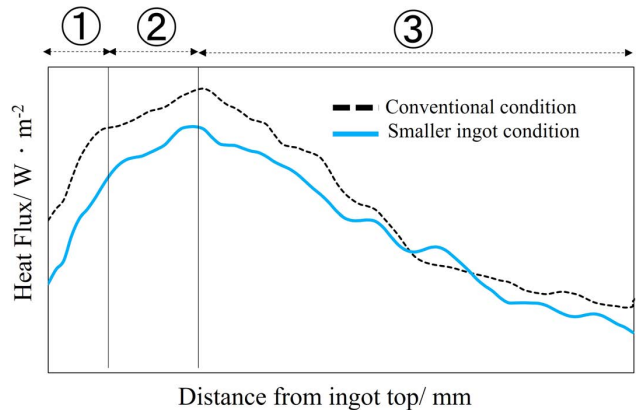


Fig. 7 従来条件と小径化条件での熱流束分布の比較

Fig. 7 から、インゴットサイズを変化させることで、石英ガラス表面の熱流束が中心付近で大きく低下することが示唆された。感度調整因子を用いて現行の操業条件の熱流束分布に合わせこむ事ができれば、インゴットサイズを小型化させた際にも品質を安定させたまま合成することができると考え、CAE による感度情報の取得を試みた。

5.2. 感度情報の取得

Fig. 7 に示した熱流束分布は、いずれも複数の変曲点を持つ分布形状を示している。この分布形状への感度調整を行うため、得られた熱流束分布の変曲点ごとにデータを①、②、③のように区切り、それぞれの区間に対する感度を算出することにした。これは、感度調整を行うにあたり、ガラス表面の中心付近の熱流束と、外周付近の熱流束を別個

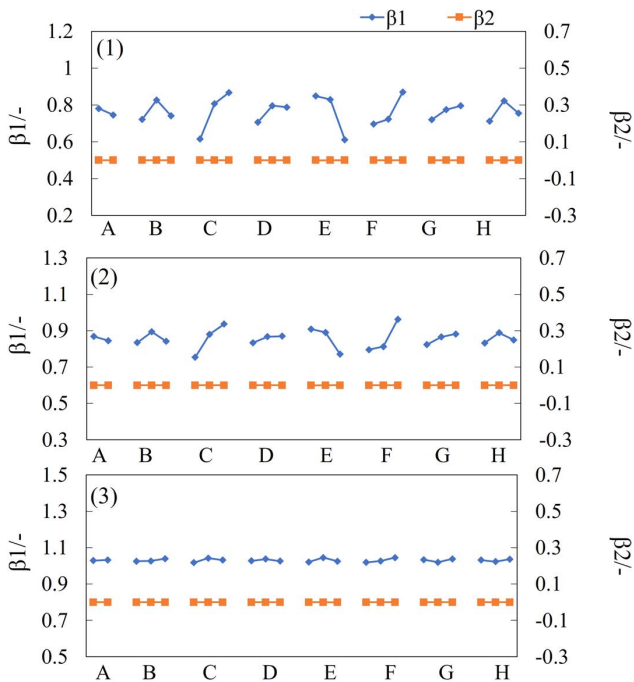


Fig. 8 β_1 , β_2 についての要因効果図
(1) 区間①, (2) 区間②, (3) 区間③

に変化させることによって、全体の熱流束分布を制御する必要があったと考えたためである。

また二次の曲率成分の評価を行うため、感度はチェビシェフの一般直交多項式に従う計算方法で β_1 , β_2 までを算出し、現行操業条件を理想と置いた時の感度に対する効果をCAEによる L_{18} 直交表実験により解析した [1]。この時予め感度調整因子とした因子以外はSN比が大きい水準に固定して実験を行った。

Fig. 8 に L_{18} 直交表実験で得られた感度の要因効果図を示す。要因効果図から、各因子の感度に対する効果と、理想条件への合わせこみのための感度調整の方向を把握することができた。ここまでの取り組みにより、各制御因子について、標準SN比及び感度の要因効果を得ることができた。これらの要因効果図をサブシステム及びプロセス機能展開表に紐づけて整理することで、石英ガラス合成システムに関するロバスト・エンジニアリング情報 (RE 情報) として、網羅的な設計情報にまとめることができた。

6 実生産炉での検証と展開

6.1. CAE での操業条件決定

得られた RE 情報を基に実炉での操業条件を決定するため、インゴットサイズを小さくした条件で感度の要因効果図 β_1 , β_2 を用いて操業条件への熱流束の感度調整を行った。Fig. 9 に CAE による感度調整で得られた条件での熱流束分布を示す。Fig. 9 より、中心側の熱流束が増加し、全体の分布形状が現行条件に近づいていることが確認できた。

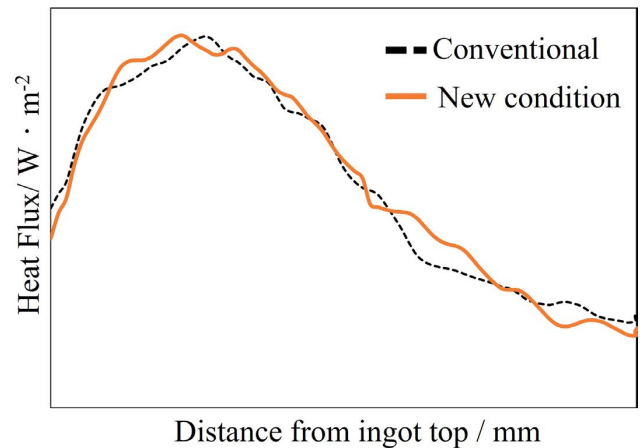


Fig. 9 従来条件と感度調整後の小径化条件の熱流束分布比較

6.2. 実生産炉での合成条件の調整と決定

得られた条件を適用して実生産炉合成を行ったところ、試作一回目の合成から安定した形状の石英インゴットを得ることができた。このことから、CAEにより得られた RE 情報が現実のシステムを表現できていることを確認した。

また得られた合成条件を生産展開することで、当初のねらい通り、品質を変化させずに1バッチあたりのL/Tの短縮及び歩留まりの低減を達成した。それぞれ、L/Tは従来比84%、部品あたりの投入費用は従来比72%に低減できた。ここから、時間当たりの投入費用から見た生産性 (L/T短縮率×部品コスト低減率) を従来の1.6倍とすることに成功した。今回のCAEによる取り組みにより大幅な損失コストの低減に成功した。

6.3. 新規合成炉の開発

我々はさらに生産性の高い石英合成を目指し、現在石英ガラス合成炉の熱効率改善に取り組んでいる。ここでは、石英ガラス合成炉構造を変更することにより、石英ガラス合成に必要な酸水素ガス使用量を低減することを目的としている。石英ガラス表面の熱流束についてのCAE解析から得られたRE情報 (Fig. 6) を用いて検討することにより、SN比への寄与が大きい因子として炉内吸気口形状及び排気口の位置が重要であることが示唆された。そこで、これらの因子を現行よりもSN比が大きくなる側へ水準変更し、SN比の安定性を担保した。そのうえで目的の熱効率を高めるため、炉内容積を20%低減することとした。Fig. 10に今回新規に設計した炉での石英ガラス表面熱流束のCAE解析結果を示す。なお、新規炉での解析では、6.1節で述べた感度調整と同様の手法により操業条件を設定している。Fig. 10に示した熱流束分布の結果から、新規炉においても現行と同様の熱流束分布を再現できることが確認された。また感度調整により得られた新規炉での操業条件では、酸水素ガス使用量が約20%減となっており、目的とする熱効率の改善効果が得られることが予想された。

以上のように、CAEを用いた二段階設計により、新規炉

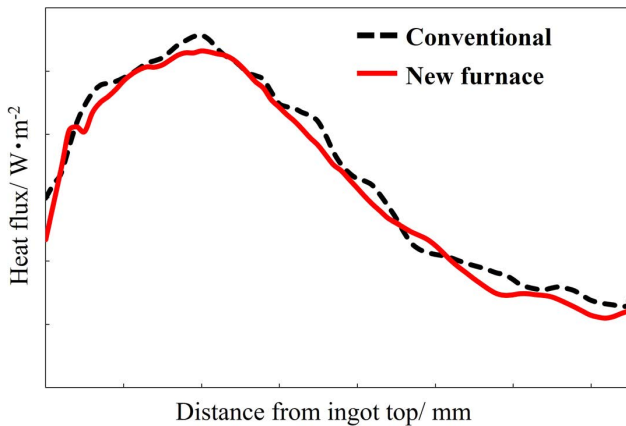


Fig. 10 従来条件と新規炉での熱流束分布の比較

構造を短い期間で、かつRE情報からの根拠を持って決定することができた。設計した新規炉は現在製作を完了し、実合成での品質確認を行っている。また実際に酸水素ガスを低減した条件で合成を行い、石英インゴットが取得できることを確認できており、今後の生産性への寄与を目指して開発を継続している。

7 まとめ

本研究では、石英ガラス合成プロセスの生産効率を向上するため、まずプロセス機能展開を行うことで網羅性のある制御因子、誤差因子の抽出を行い、合成炉内環境のCAEによる機能性評価を行った。次に理想の熱流束分布曲線を考慮した感度調整を行い、実生産炉に適用可能な製造条件を見出した。

本論文では、石英ガラス合成の開発を通じて、機能性評価手法の効果を確認できた。複雑な現象を伴うパラメー

ターの効果を機能に対する要因効果としてプロセス機能展開表上に整理することで、定量的かつ網羅的な技術情報として蓄積した。CAEによる熱流束分布形状の感度調整と、実生産炉での効果を確認したことで、CAEを用いた試作レスの開発プロセスを確立することができた。

以上により得られたRE情報は、今回機能として選んだ熱流束分布だけでなく、他の品質及び生産性課題についても汎用的に適用できるものである。今後今回得られたRE情報を用いて、石英ガラス合成の更なる生産性向上及び高品質化に取り組んでいく。

引用文献

- [1] 田口玄一，横山巽子，ベーシックオフライン品質工学，日本規格協会，2008.
- [2] 嘉指伸一，“プロセス機能展開表の活用とロバストエンジニアリング情報の活用による初期型不良の撲滅と立上げリードタイムの短縮，”全国能率大会，63，pp. B73-76，2012.
- [3] 水谷幸夫，燃焼工学 第3版，森北出版株式会社，2013.
- [4] 嘉指伸一，“品質工学を実務で活用する「品質工学ステップ展開」，”標準化と品質管理，vol. 69，no. 9，pp. 57-69，2016.
- [5] 佐藤幸太，嘉指伸一，“プロセス機能展開表を活用した光学ガラスの溶解技術開発，”品質工学，vol. 29，no. 1，pp. 30-38，2021.
- [6] 小西洋平，武村直輝，齊藤卓一，“燃焼～溶融のCAEによる機能性評価と感度調整による試作レス開発プロセスの確立，”第29回品質工学研究発表大会，No. 5，pp. 20-25，2021.

小西洋平 Yohei KONISHI
生産本部 技術統括部 製造部
Production Department
Technology Sector
Production Technology Division

武村直輝 Naoki TAKEMURA
生産本部 技術統括部 製造部
Production Department
Technology Sector
Production Technology Division

中野史康 Fumiyasu NAKANO
生産本部 技術統括部 製造部
Production Department
Technology Sector
Production Technology Division

齊藤卓一 Takuichi SAITO
生産本部 技術統括部 製造部
Production Department
Technology Sector
Production Technology Division



小西洋平
Yohei KONISHI



武村直輝
Naoki TAKEMURA



中野史康
Fumiyasu NAKANO



齊藤卓一
Takuichi SAITO