

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[†]

佐藤幸太，嘉指伸一

Development of Optical Glass Melting Technology using a Process Task Visualization Chart

Kota SATO and Shinichi KAZASHI

光学ガラスの新硝種および改良品の開発にあたり、熔解工程における垂直立ち上げを目指し、実験室での小規模評価に品質工学を活用した。従来は、小規模の実験で工程ごとに部分最適を行い、製造条件を定め、次に大規模な実験で量産できるか確認してきた。しかし、小規模の実験結果が大規模の実験で再現せず、量産立ち上げに時間を要するという問題が生じることがあった。この問題を解決するため、はじめに、工程全体を俯瞰し検討すべき因子を抽出するとともに、工程全体での最適化を検討した。次に、評価尺度と誤差因子を工夫し、大規模な実験で再現する小規模評価方法を確立した。この方法を多くの硝種に展開し、製造技術情報として蓄積すると、その情報は同系統の他の硝種に対しても適用できることが分かった。その結果、新たに開発した硝種であっても、直交表実験を行わずに短期間に量産立ち上げを実現した。

In the development of new and improved types of optical glass, we have applied quality engineering to small-scale evaluation in the laboratory, with the goal of vertical ramp-up in the melting process. Previously, we had optimized each process individually in small-scale experiments, determined the optimal production conditions, and then carried out a large-scale experiment to confirm that these conditions were actually suitable for volume production. A problem that had sometimes delayed the start of volume production in the past was that the small-scale experimental results could not be replicated in the large-scale experiment. To solve this problem, we started by surveying the entire process, selecting the factors to be studied, and studying the optimization of the process as a whole. Next we adjusted the evaluation metrics and noise factors to obtain small-scale evaluation methods that would give results that could be replicated in large-scale experiments. By applying this methodology to many types of glass, we obtained a body of production technology information that turned out to be applicable to many types of optical glass in the same family. The result was that we were able to ramp up volume production of even newly developed types of glass quickly, without performing orthogonal array experiments.

Key words 光学ガラス、内部透過率、SN比、タグチメソッド、品質工学
optical glass, internal transmittance, S/N ratio, Taguchi methods, quality engineering

1 はじめに

1.1. 光学ガラスについて

光学ガラスは、カメラや望遠鏡、顕微鏡など光学機器において像の伝達に用いられるガラスであり、レンズやプリズムとして使用される。光学ガラスの光学的性質を表す光学定数は、Fig. 1 に示すように、d 線（波長 587.6 nm）に対する屈折率 n_d と、色分散を表すアッベ数 v_d の二つの組合せで分類される。F 線（波長 486.1 nm）、C 線（波長 656.3 nm）に対する屈折率をそれぞれ n_F 、 n_C で表すと、アッベ数は次式で定義される。

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (1)$$

Fig. 1 中の領域分けは、大別するとクラウン（ v_d が 55 以上）、フリント（ v_d が 50 以下）に分けられる。さらに、特徴的な化学成分によって細かく領域が分けられており [1]、例えば、最も左下の領域は、ふっ化物（F）を加えたクラウン（K）であることから、FK 領域と呼んでいる。

像の精度を高めるためには、収差を取り除く必要がある。例えば、光の屈折率が波長によって違うことに起因する色収差は、光学定数の異なるレンズを組み合わせで除去する。

[†] 本稿は、著者の引用文献 [8] の一般社団法人品質工学会より許諾を得ている。

他にも様々な取差を取り除くため、多くの硝種（ガラス材料の品種）が必要となる。近年の光学機器の高性能化、小型化に伴い、新硝種の開発や既存硝種の改良に対する要求はますます高まっており、それらの硝種を短期間に量産立ち上げすることが極めて重要である。

1.2. 課題に対するアプローチ

従来は、新硝種や既存硝種の改良品を量産立ち上げする場合、小規模実験で工程ごとに制御因子の水準を振って製造条件を定め、大規模な実験で量産性を確認してきた。しかし、小規模と大規模な実験では規模に差があるだけでなく、溶解プロセスも異なるため、小規模実験で得られた結

果が大規模実験で再現しないという課題が生じていた。

この課題を解決するため、本研究では、①プロセス機能展開表 [2] を活用し、広範囲の工程で同時最適化を検討した。次に、②評価尺度と誤差因子を工夫し、大規模な量産で小規模実験の結果が再現する評価方法を確立した。この評価方法を他の硝種における直交表実験に展開した結果、評価方法の有効性と汎用性を確認できたので、③その実験結果をロバストエンジニアリング (RE) 情報 [3] として蓄積した。その情報は、同系統の他の硝種に対しても適用できることが分かり、新たに開発した硝種であっても、直交表実験レスで、短期間に量産立ち上げを行うことができたので、以下に報告する。

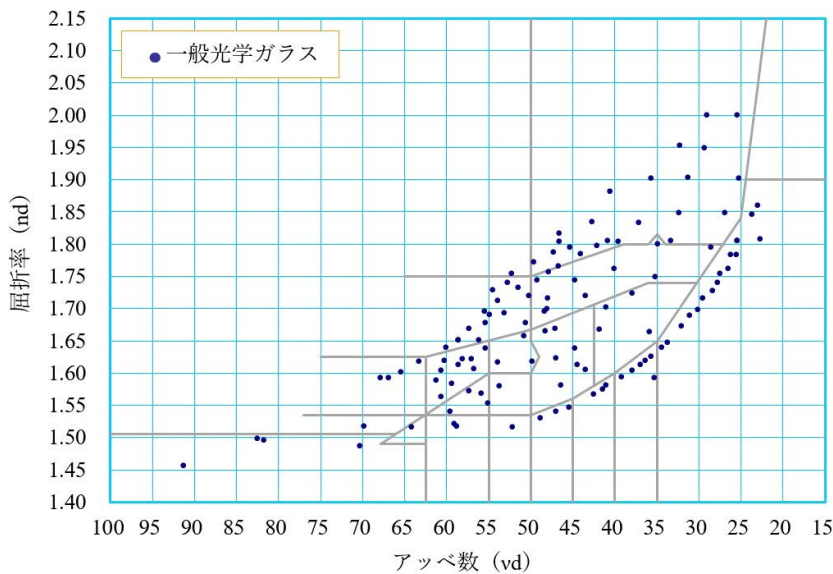


Fig. 1 nd -vd ダイアグラム (光ガラス株式会社)

Table 1 光学ガラスの開発・設計からガラス製造までの横型プロセス機能展開表

工程	開発・設計		製造								
	組成設計	調合組成	原料選定	調合		前溶解	混合・配合	連続溶解	成形	ラフアニール	
工程の目的	顧客要望に沿った光学ガラスの性能になるよう組成を設計する。	設計された組成の元素比率になるよう、使用する原材料の種類や割合を決める。	調合組成で決めた原材料のメーカーや純度を決定する。	ガラス種や調合する量によって決められた複数の原料を精度高く計量する。	ひょう量した複数の原料を均等に混ぜ合わせる。	調合した原料を溶解炉に投入し熱を加え均一なガラスフリットを作る。	ガラスフリットを均等に混ぜ合わせる。目標の光学定数になる複数のフリットを均等に配合する。	配合されたガラスフリットを再度溶解し泡、脈の無い均質で透過率の高いガラス融液にする。	ガラス融液を均等に冷却し目的の形状に成形する。ゆっくり冷まして均一にひずみを下げる。	成形したガラスが割れないように、ゆっくり冷まして均一にひずみを下げる。	
工程の機能 (働き)											
制御因子	・元素種類 ・元素比率	・塩の種類 炭酸塩など ・添加材種類 脱泡材など ・添加材量	・原料メーカー ・不純物規格 ・結晶系	・ひょう量順序 ・器具種類	・混合機種 ・混合条件	・溶解条件	・混合機種 ・混合条件	・溶解条件 ・攪拌条件	・冷媒種類 ・冷却量 ・温度バランス	・降温速度 ・温度 ・ヒータ距離	
工程内の誤差因子		・製法 ・純度	・製法 ・規格内変動	・環境 ・劣化 ・疲労	・場所 ・環境 ・劣化	・場所 ・環境 ・劣化 ・炉体差	・場所 ・環境 ・劣化	・場所 ・環境 ・劣化 ・炉体差	・場所 ・環境 ・劣化 ・機差	・場所 ・劣化	
標示因子		・硝種	・硝種	・原料種類	・硝種	・硝種	・硝種	・硝種	・硝種 ・成形サイズ	・硝種	
システム分割	従来の範囲 ←-----→			←-----→							

2 プロセス機能展開表

Table 1 に、光学ガラスの開発設計からガラス製造までの横型プロセス機能展開表を示す。本表は、開発・設計から製造までのプロセスについて、工程順に、工程の目的とその工程の機能、制御因子、工程内の誤差因子、標示因子、システム分割の範囲を表にしたものである。

工程の目的には、各工程の目的について、理想の状態を表現した。工程の機能には、その工程の目的を達成するための機能を働きとして記述した。制御因子には、その工程で決めなければならない条件をリストアップするとともに、従来は検討していなかった因子も抽出した。工程内の誤差因子には、その工程のばらつき要因をリストアップした。本研究の場合、硝種はある範囲では誤差因子であるが、広い範囲では標示因子とした。また、劣化は、各工程で用いる設備の経年劣化を表し、製造条件のばらつきを生む。ある範囲ではフィードバックを行っているが、そのような環境や装置性能の変化に対してロバストにする必要があると考えた。最後の行には、システム分割の範囲を示した。

この表を用いて全体を俯瞰すると、組成設計で求めた元素の比率は、光学定数や化学的性質、熱的性質、機械的性質などが変化するため、硝種ごとの実験では固定条件となる。その他に硝材に要求される性質 (Table 2) については、

Table 2 光学ガラスの硝材に要求される性質 [4]

性質	内容
光学定数	屈折率, 分散など
化学的性質	耐酸性, 耐水性など
熱的性質	ガラス転移点など
機械的性質	摩耗度など
その他	透過率, 泡・異物, 脈理など

従来範囲の実験において、範囲外の固定条件が変化すると崩れてしまった。よって、調合組成からラファニールまでの工程全体を一つのシステムとして、同時に最適化することを検討した。

3 実験

3.1. 基本機能の検討

溶解の目的は、調合した原材料に熱を加え、均質なガラス融液を得ることである。この融液は、ガラス化反応によって得られることから、Fig. 2 に示す基本機能を考えた。溶解規模差によって生じる熱量の違いを Fig. 3 に、大規模量産における場所 P によるガラス化反応の違いを Fig. 4 に示す。小規模と大規模な量産では、原材料やガラス融液に

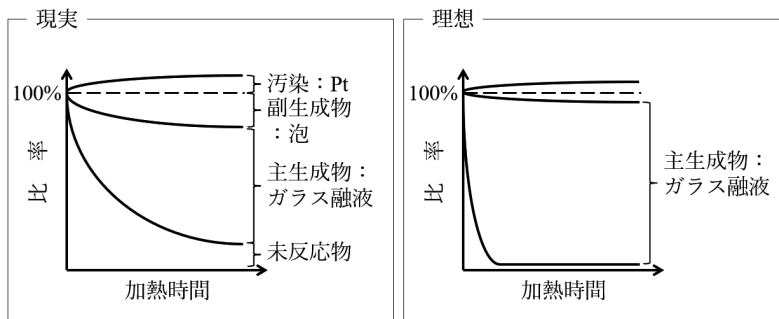


Fig. 2 ガラス溶解の基本機能

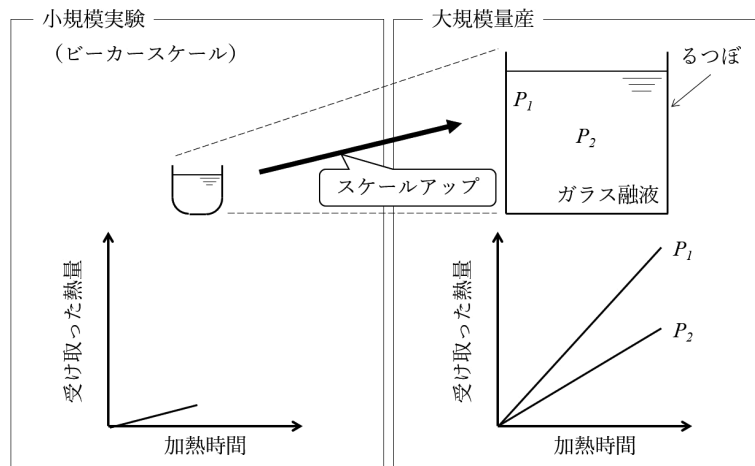


Fig. 3 熱量の溶解規模差

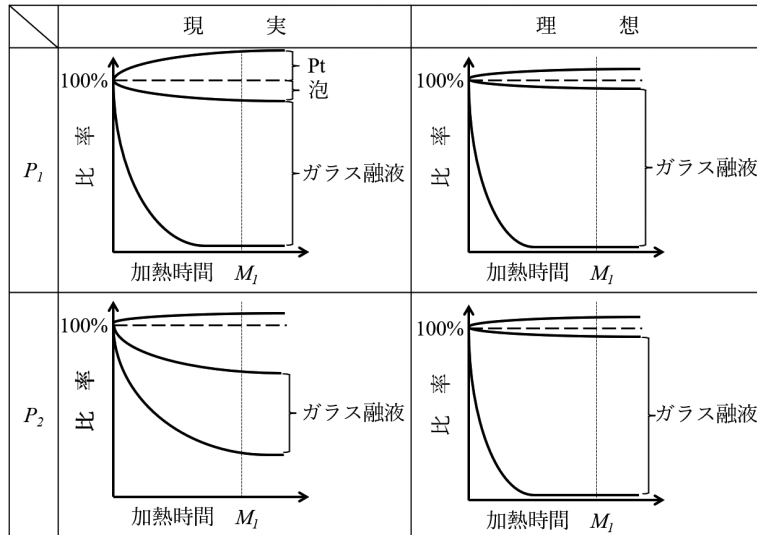


Fig. 4 大規模量産における場所による反応の違い

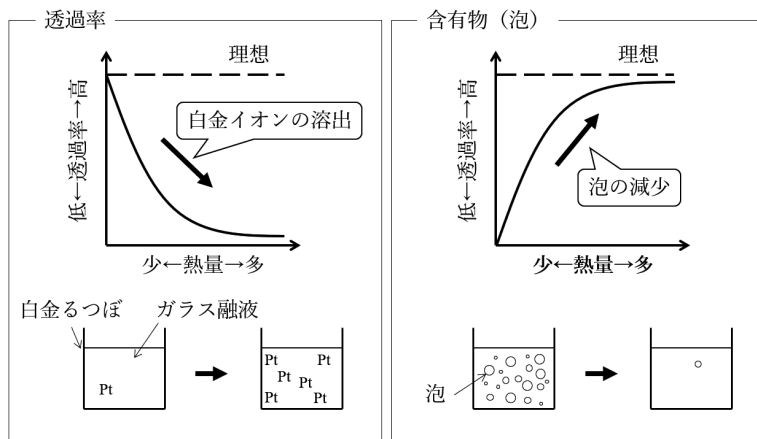


Fig. 5 熱量に対する透過率と含有物の関係

与える熱量に差が生じる。さらに、量産では規模が大きいため、場所によって受け取る熱量の違いが生じやすい。その結果、成分の不均一が生じることで、光を透して屈折させるという機能が低下すると考えた。したがって、熱量によらずガラス化反応が安定し、反応速度が速いことを理想と考えた。

3.2. 評価尺度と直交表の割付け

原材料が受け取った熱量や、反応率の測定は難しいので、その代用として、光を透すという機能に着目した。Table 2 で示した性質の中で、熱が加わる溶解工程では、透過率と泡品質がトレードオフの関係となる (Fig. 5)。熱量を大きくすると、るつぼの材質である白金がイオン化してガラス融液に混入し、近紫外域の透過率が低下するが、泡は澄清により除去できる [4]。この現象は、ほぼ全ての硝種に共通する。そこで、熱量によらずガラスの透過率が常に高いことを理想とした。

実際の評価では、光学ガラスの内部透過率を計測した。内部透過率とは、ガラス表面の反射損失を含まない分光透

過率のことで、規格 [5] にしたがって測定した。Fig. 6 (a) に、硝種01の内部透過率曲線を示す。ここで、 N_1 は熱量の少ない条件であり、 N_2 は熱量の多い条件である。 N_1 では、白金イオンの混入が少ないため、400 nm以下の波長域の内部透過率が高くなるが、400 nm以上の波長域では、多く残存した泡が光の透過を阻害し、内部透過率が下がっている。内部透過率を用いることで、一つのテストピースで透過率と泡を同時に評価できると考えた。

信号因子は加熱時間と考えて実験した。信号水準を増やすと実験数が増えてしまうため、1水準とした。誤差因子は、大規模な量産での場所の違いとして、加熱時間以外で熱量を変化させる因子をTable 1から抽出し、調合して直交表 L_{18} の外側に割り付けた(2水準)。誤差因子の水準値 N_i は、予備実験を行い、ガラス化するのに最低限必要な値とした。

内部透過率は、算術的加法性を持たせるため、式(2)でオメガ変換値 Ω を求めた [6]。ここで p は、内部透過率を表す。

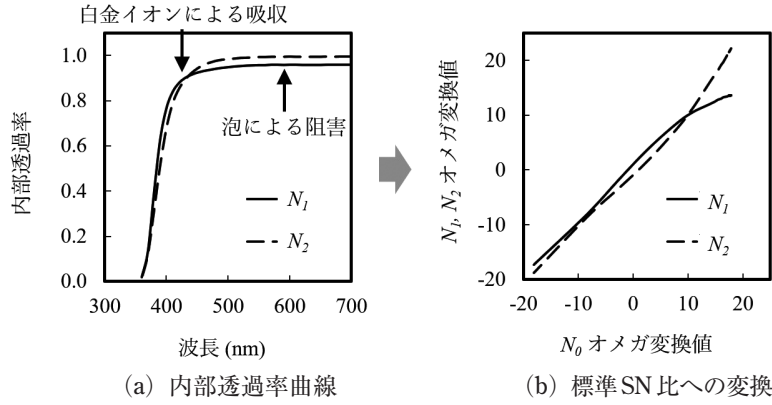


Fig. 6 内部透過率曲線と標準 SN 比への変換

$$\Omega = 10 \log \left(\frac{p}{1-p} \right) \quad (2)$$

オメガ変換値について、 N_1 , N_2 の平均値 N_0 に対して、 N_1 , N_2 をプロットしたグラフを Fig. 6 (b) に示す。誤差因子に対する内部透過率の安定性は、 N_1 , N_2 の平均値を標準条件の出力 N_0 とした標準 SN 比で評価した。

制御因子は、Table 1 から各工程の因子をバランスよく選択し、直交表 L_{18} の内側に割り付けた。

Table 3 測定結果の例

	波長 (nm)	内部透過率のオメガ変換値		
		N_0	N_1	N_2
1	360	-18.086	-17.37	-18.80
2	370	-8.416	-8.18	-8.65
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	690	17.887	13.58	22.19
35	700	17.887	13.58	22.19

4 硝種01の結果

4.1. 標準 SN 比の計算

直交表 L_{18} に従って、小規模実験で硝種01のテストピースを作製し、内部透過率を測定した。測定結果の例を Table 3 に、標準 SN 比の計算方法を下記に示す。

$$S_T = (-17.37)^2 + (-8.18)^2 + \dots + 22.19^2 = 16262.2130 \quad (f = 2 \times 35 = 70)$$

$$r = (-18.086)^2 + (-8.416)^2 + \dots + 17.887^2 = 7804.0274$$

$$L_1 = (-18.086) \times (-17.37) + \dots + 17.887 \times 13.58 = 6315.4123$$

$$L_2 = (-18.086) \times (-18.80) + \dots + 17.887 \times 22.19 = 9292.6425$$

$$S_\beta = \frac{(L_1 + L_2)^2}{2r} = \frac{(6315.4123 + 9292.6425)^2}{2 \times 7804.0274} = 15608.0548 \quad (f = 1)$$

$$S_{N \times \beta} = \frac{(L_1 - L_2)^2}{2r} = \frac{(6315.4123 - 9292.6425)^2}{2 \times 7804.0274} = 567.9055 \quad (f = 1)$$

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta} = 16262.2130 - 15608.0548 - 567.9055 = 86.2527 \quad (f = 70 - 1 - 1 = 68)$$

$$V_e = \frac{S_e}{f} = \frac{86.2527}{68} = 1.26842$$

$$S_N = S_{N \times \beta} + S_e = 567.9055 + 86.2527 = 654.1582 \quad (f = 1 + 68 = 69)$$

$$V_N = \frac{S_N}{f} = \frac{654.1582}{69} = 9.4805$$

標準 SN 比

$$\eta = 10 \log \left(\frac{2r}{V_N} \right) = 10 \log \left(\frac{2 \times 7804.0274}{9.4805} \right) = 32.17 (db)$$

4.2. 要因効果図と最適条件の決定

硝種01の要因効果図を Fig. 7 に示す。この図より SN 比の大きい水準は、 $A_2 B_2 C_3 D_2 E_1 F_1 G_1 H_2$ となる。

内部透過率は、高いことが理想であるため、目的の波長範囲における N_0 のオメガ変換値を感度とした。感度の要因効果図を Fig. 8 に示す。最適条件として、 C_3 を C_1 , F_1 を F_3 とし、最終的に、 $A_2 B_2 C_1 D_2 E_1 F_3 G_1 H_2$ とした。

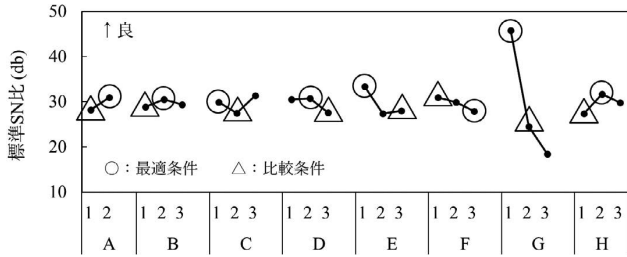


Fig. 7 硝種01における SN 比の要因効果図



Fig. 8 硝種01における感度の要因効果図

Table 4 推定結果と確認実験の比較

	標準 SN 比 (db)		感度 (db)	
	推定	確認	推定	確認
最適条件	50.67	48.96	16.05	15.41
比較条件	19.01	17.89	10.13	8.46
利得	31.66	31.07	5.92	6.94

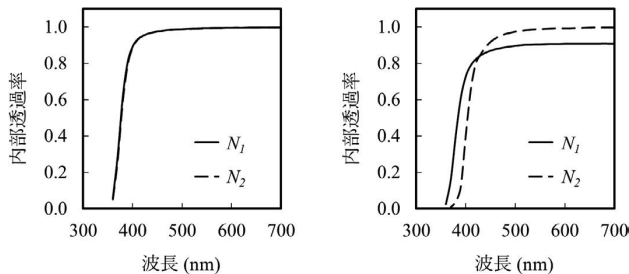


Fig. 9 確認実験の内部透過率曲線の比較

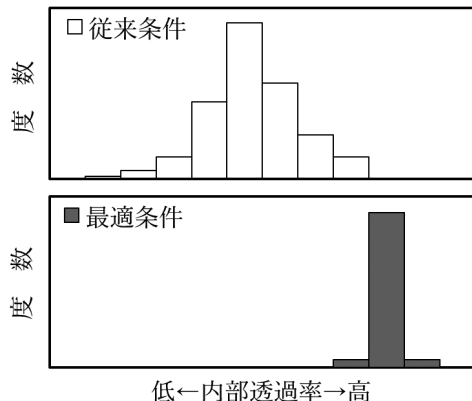


Fig. 10 硝種01における量産再現性の確認 (目的波長の内部透過率のヒストグラム)

4.3. 確認実験

最適条件と比較条件を用いて、確認実験を行った。その結果、再現性が得られた (Table 4, Fig. 9)。最適条件を量産の製造条件に反映すると、大規模な量産でも再現し、従来条件に対して内部透過率の高い硝材を安定して製造することができた (Fig. 10)。

5 直交表実験の多硝種展開とロバストエンジニアリング情報の蓄積

硝種01と同様の直交表実験を、新たに開発した硝種も含め、同系統 (γ) の硝種02, 03についても実施した。Table 5に、各直交表実験の利得再現性を示す。硝種によらず利得再現性が得られたと同時に、量産で高品質の硝材が安定して得られた。硝種01と比較して硝種02以降の利得が小さいのは、制御因子の水準幅を狭めたこと、異なる制御因子も取り上げていることが影響していると考えた。これらより、評価方法の有効性と汎用性を確認できたので、異なる系統 (δ) の硝種05~08に対しても直交表実験を実施した。

Table 5 各直交表実験の利得再現性 (標準 SN 比)

硝種	直交表	推定利得 (db)	確認利得 (db)
01	L_{18}	31.66	31.07
02	L_{12}	12.75	13.60
	L_{18}	6.50	6.10
03	L_{18}	12.80	9.95

多くの硝種で実施した直交表実験の結果を技術情報として蓄積するため、一つの表にまとめた (Table 6)。本表は、横型プロセス機能展開表の行列を入れ替え、縦型プロセス機能展開表にし、直交表実験の結果を列に追記した表である。この時、表には、SN比の情報だけでなく、各制御因子の水準を変えたときの感度やコストの変化も記した。我々は、この表をロバストエンジニアリング (RE) 情報と呼んでいる [2]。

RE情報を俯瞰すると、硝種によらずSN比に効果のある制御因子や水準の方向を把握できるようになった。これにより、安定性として水準を固定したほうが良い制御因子や、そうでない制御因子が明確になり、次製品に展開可能な汎用性のある製造技術情報が蓄積された。

6 成果

6.1. 直交表実験レスによる量産立ち上げ

硝種ごとの実験の目的と進め方を Table 7 に示す。RE情報の要因効果を横展開することで、系統γ, δ内の硝種については、直交表実験を行わずに、RE情報から量産の製造条

Table 6 系統δの縦型プロセス機能展開表とRE情報

工程	制御因子	硝種05 L _{IT} -1			硝種05 L _{IT} -2			硝種06 L _{IT} -1			硝種06 L _{IT} -2			硝種07 L _{IT}			硝種08 L _{IT}		
		利得再現性	推定確認	32.0 db 41.0 db	利得再現性	推定確認	26.1 db 20.9 db	利得再現性	推定確認	49.5 db 51.3 db	利得再現性	推定確認	5.3 db 4.6 db	利得再現性	推定確認	14.3 db 12.5 db	利得再現性	推定確認	55.4 db 46.8 db
		誤差因子: ●●		SN比 効果園	誤差因子: ●●		SN比 効果園	誤差因子: ●●		SN比 効果園	誤差因子: ●●		SN比 効果園	誤差因子: ●●		SN比 効果園	誤差因子: ●●		SN比 効果園
		N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3			N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3			N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3			N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3			N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3			N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3		
調査組成 原料選定 調査 前焙解 混合・配合 連続焙解 成形 ラフア ニール	***	***		***			***			***			***			***			***
	1 2 3	20.90 23.31 24.03	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	***		***			***			***			***			***			***
	1 2 3	15.85 18.81 17.19	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.71	—	***			***			***			***			***			***

Table 7 硝種ごとの実験の目的と進め方

系統	硝種	目的	直交表実験
γ	01	高透過率化	1回
	02	高透過率化	2回
	03	新規開発	1回
	04	新規開発	レス
δ	05	高透過率化	2回
	06	不良削減	2回
	07	高透過率化	1回
	08	新規開発	1回
	09~11	新規開発	レス
	12	不良削減	レス
	13~16	高透過率化	レス

件を決定することができた。実際の評価では、はじめに、小規模実験で目的の性質が得られるか確認し、感度調整が必要な場合は、できるだけSN比を犠牲にせず、小規模実験でチューニングした。次に、大規模な実験で問題なく量産できるか確認した。新規に開発した硝種であっても、RE情報が蓄積されている系統であれば、直交表実験レスで

- 1) 従来の実験方法
- 2) 直交表実験レス

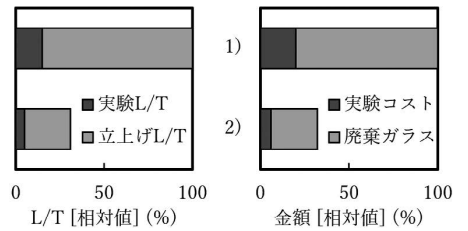


Fig. 11 L/Tの短縮とコスト削減の効果

短期間の内に量産の製造条件を決定し、新硝種の垂直立ち上げが可能となった(硝種04, 09~11)。

6.2. リードタイム短縮とコスト削減

本研究の成果について、従来方法との比較を Fig. 11 に示す。実験リードタイム (L/T) が1/4になり、大規模実験から量産までの期間が1/3に短縮でき、実験費用も1/3に削減できた。その結果、実験に関わるエネルギーがCO₂換算 [7] で約35t/年の削減となり、さらに、不良の削減により廃棄物量がCO₂換算で約103t/年の削減となった。

7 まとめ

本研究により、様々な硝種に展開可能な、量産再現性のある小規模実験方法を確立できた。その中で、我々が実施したプロセス機能展開表の活用方法を下記に示す。

- (1) 広範囲の工程全体を顕在化し、検討すべき範囲を明確にする（システム分割）。
- (2) 評価尺度と誤差因子を検討し、大規模な量産で再現性のある小規模実験を行う。
- (3) 多硝種に展開した直交表実験の結果を、縦型プロセス機能展開表に整理し、固定すべき制御因子を明確にする（RE情報の蓄積）。

この活用方法により、次製品に展開できる汎用性のある製造技術を確立できた。その結果、直交表実験レスで新硝種の垂直立ち上げを実現した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導頂いた元ニコンの関道子氏に感謝申し上げます。

引用文献

- [1] 泉谷徹郎, 光学ガラス, 共立出版, 1984.
- [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] 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.
- [4] 山根正之 他, ガラス工学ハンドブック, 朝倉書店, 2010.
- [5] 光学ガラスの内部透過率の測定方法, JOGIS 17: 2012.
- [6] 田口玄一, 品質工学講座1 開発・設計段階の品質工学, 日本規格協会, 1988.
- [7] 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル, Ver 4.0, 環境省, 経済産業省, 2015, pp. II-32-II-33.
- [8] 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.

佐藤幸太 Kota SATO
光ガラス株式会社
HIKARI GLASS CO., LTD.



佐藤幸太
Kota SATO

嘉指伸一 Shinichi KAZASHI
嘉指技術品質研究所
KAZASHI Technological Quality Research



嘉指伸一
Shinichi KAZASHI