



工業炉における酸素バーナの操業最適化技術の開発

Optimization of Operation for Multiple Oxygen Burners in Industrial Furnaces

山口 雅志* 諸熊 晶** 小林 悠**
YAMAGUCHI Mashashi MOROKUMA Akira KOBAYASHI Yu

複数基のバーナを用いる工業炉において、バーナ条件の調整には最適化の余地が残されているが、バーナ設置数が多い程条件の組合せは膨大であり、人手による探索は非現実的である。そこで本開発ではベイズ最適化に基づくデータ駆動型最適化手法を構築した。まず数値シミュレーションを用いて試験炉における2基のバーナの運転条件を最適化した結果、少ない試行回数でNOx排出濃度を削減できる組合せを見出した。続いてバーナを4基に増やして実証評価を行ったところ、より膨大な探索空間にも関わらず、短期間で有望な条件に到達した。以上より、ベイズ最適化は複雑なバーナ条件の最適化に有効であり、実用化に向けた適用の可能性が高いことを示した。

Industrial furnaces often operate multiple burners, where conventional tuning remains suboptimal and manual search becomes infeasible as the combinatorial space explodes. We built a data-driven framework based on Bayesian optimization to efficiently select operating conditions. First, computational fluid dynamics for a two-burner test furnace identified NOx-reducing settings with few trials. Next, we validated on a four-burner furnace. Despite the vastly larger search space, Bayesian optimization reached promising conditions rapidly. These results show that Bayesian optimization is effective for optimizing complex burner operations and has strong practical applicability.

1. 緒言

鉄鋼、ガラス、非鉄金属などの素材産業では、製造プロセスにおいて製品を加熱するための工業炉を広く用いており、これらの多くはバーナの燃焼エネルギーを製品加熱に利用している。工業炉からのCO₂排出は年間約1.5億tと言われ、産業部門でも大きな割合を占めるため、各社で排出量削減策の検討が急がれている¹⁾。

酸素燃焼は、酸化剤として空気ではなくO₂あるいは酸素富化空気を用いる手法である。反応に寄与しないN₂ガスを排除することで燃焼による発熱量を効率よく利用でき、燃料使用量の削減が可能である。炭化水素燃料を使用する場合は、空気燃焼と比較して燃料使用量、ひいてはCO₂排出量を最大で50%程度削減可能である^{2,3)}。従来はコスト削減の観点から導入が進められてきたが、近年ではCO₂削減技術として改めて注目されている。

一方で酸素燃焼は、その火炎温度の高さからサーマルNOxの生成が課題となる。純O₂を用いる場合でも、

製造方法に由来するN₂が数%含まれることがあり、また実炉では外気の巻き込みが避けられないため、空気燃焼よりもNOx排出量が大きくなる場合もある。この対策として、Fig.1に示すステージング燃焼技術を適用した酸素バーナが広く用いられる。酸化剤を2段階に分けて噴出することにより、1段階では高温だが酸素不足の火炎を形成する一方、2段階では酸化剤が炉内ガスと混合しながら供給されるため局所的な高温部の発生を抑制でき、NOx生成を低減することができる。

工業炉では、単一バーナを用いる小規模な炉もあるが、多くの場合、複数基のバーナを同時に使用しており、特に金属加熱炉やガラス溶解炉などでは10基以上のバーナを用いる大規模な燃焼炉も存在する。このよう

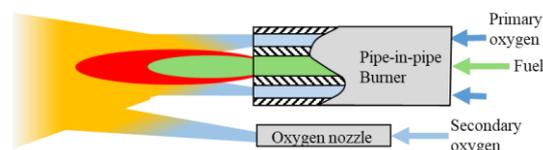


Fig.1 The Oxygen burner for industrial furnaces

* 技術開発ユニット開発企画統括部開発業務部デジタル解析課

** 技術開発ユニット山梨ソリューションセンター酸素燃焼開発部技術課

な複数バーナの運転条件の調整は、各バーナの出力調整にとどまることが多いが、理論的にはバーナ毎に当量比や酸化剤の分配比率を変えることで、NOx 抑制やより理想的な温度場の形成を図れる可能性がある。しかし、バーナ設置数が多い程、取りうる組合せ数は飛躍的に増加し、人の手で最適条件を探索することは現実的でない。さらに H₂ や NH₃ といった代替燃料を導入すると調整パラメータは一層増加する。

そこで本開発では、膨大な探索空間に対し現実的な試行回数で条件探索する方法として、ベイズ最適化に基づくデータ駆動型のバーナ運転条件の最適化を検討した。まず数値シミュレーションにより最適化の可能性を検証し、その後、実験により有効性を実証した。

2. ベイズ最適化

ベイズ最適化は、目的関数の評価に高いコストを要する場合に、少ない試行回数で高性能な解を探索するための手法である^{4,5)}。特に機械学習モデルのハイパーパラメータのチューニングや実験条件の最適化に広く利用されている。ガウス過程による確率モデルを用いて目的関数をモデル化し、獲得関数を最大化する点を次の評価点として選択する。これにより探索と活用のバランスを取りながら、非線形かつ多次元の問題に対して効率的に収束を図る。

ガウス過程は、無限次元の確率過程であり、任意の有限次元の部分集合が多変量正規分布に従う。これにより、関数の不確実性を表現できる。ガウス過程は平均関数 $\mu(x)$ 、共分散（カーネル）関数 $k(x, x')$ により次のように定義される。

$$f(x) \sim GP(\mu(x), k(x, x')) \quad (1)$$

カーネル関数は入力点間の相関を表現しており、どのような関数を選択するかがガウス過程の性能に大きな影響を与える。本開発では、代表的なカーネルである下式の RBF (Radial Basis Function) カーネルを用いた。

$$k(x, x') = \sigma^2 \exp\left(-\frac{\|x - x'\|^2}{2l^2}\right) \quad (2)$$

ここで σ^2 は分散、 l は長さスケールである。非線形な関係をモデル化する際に広く使用される。

ガウス過程回帰により作成したモデルから次の評価点を決定するためには、獲得関数と呼ばれる評価

関数を用いる。いくつかの獲得関数が提案されているが、本開発では最大化問題に対する期待改善量を見積る下式の EI (Expected Improvement) を用いた。

$$\begin{aligned} EI(x) &= E[\max(0, f(x) - f^*)] \\ &= (\mu(x) - f^*)\Phi(Z) + \sigma(x)\phi(Z) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで f^* は観測済みの最大値、 $\mu(x)$ は予測平均、 $\sigma(x)$ は予測標準偏差である。 Φ は累積分布関数であり、 $Z = (\mu(x) - f^*)/\sigma(x)$ である。最小化問題を扱う場合は、目的を符号反転するなどして最大化問題に置き換えて運用する。本開発では Python によりベイズ最適化アルゴリズムを構築した。オープンソースの Python ライブラリである Botorch 0.14.0 を用い⁶⁾、ガウス過程モデル、カーネル関数、獲得関数など同ライブラリに実装されたモデルを利用した。

3. 数値シミュレーションによる検証

3.1 流体解析モデル

ベイズ最適化の有効性を検証するため、保有する燃焼試験炉を対象とした数値シミュレーションを実施した。解析対象は Fig.2 に示す耐火物に囲われた直方体の試験炉であり、側面に 2 本のバーナを配置し、燃焼ガスは 1 か所の煙道から排出する。バーナは 2 重管のメインバーナと単管の酸素ノズルから構成されるステージング型である。2 重管の内側から燃料、外側から酸化剤の一部を供給して酸素不足の高温火炎を形成し、遅れて酸素ノズルから供給する残りの酸化剤が合流して完全燃焼に至る。

Table1 に主要な解析モデルを示す。本解析には商用ソルバである STAR-CCM+を使用した。定常解析であり、燃焼モデルには非予混合フレームレットアプローチに基づく化学平衡モデルを用い、各種物性値は GRI Mech 3.0 のデータベースを参照する。PDF テーブルには NOx 種を含めず、拡大 Zeldovich 機構によりサーマル NOx を後处理的に計算し、生成量を求める。乱流モデルは Realizable k- ϵ モデルであり、壁面近傍は混合壁関数を用いる。輻射伝熱の解析には Discrete Ordinate 法を用い、ガス輻射は Weighted Sum of Gray Gases Model によりモデル化し、Hottel の表に基づいて H₂O と CO₂ の寄与を考慮する。ここでは燃料は CH₄ とし、酸化剤は O₂ 95vol%、N₂ 5vol% とした。炉壁外表面に対流伝熱及び輻射伝熱による放熱を考慮した熱的境界条件を与える。

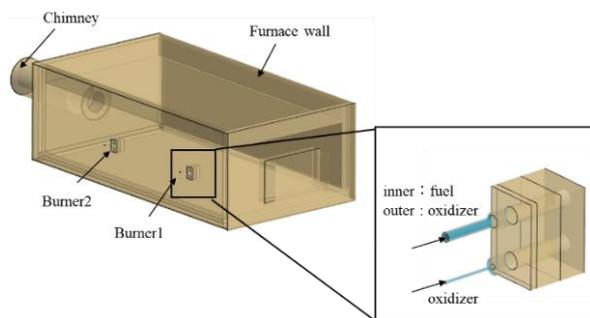


Fig.2 Computational domain of test furnace

Table 1 Calculation model

Category	Model / Setting
Analysis type	Steady state
Combustion model	Flamelet approach - Chemical equilibrium model + Extended Zeldovich mechanism
Reaction mech.	GRI Mech 3.0
Turbulent model	Realizable k-ε model + Blended wall function
Radiation model	Discrete Ordinate method + WSGG model
Fuel	CH ₄
Oxidizer	O ₂ 95vol% + N ₂ 5vol%

3.2 運転範囲とベイズ最適化条件

説明変数及び目的関数を Table2 に示す。説明変数はバーナの運転条件である燃焼量、酸素比、ステーシング比率である。ここで燃焼量は低位発熱量基準で燃料流量から算出した値とし、酸素比は当量比の逆数であり、完全燃焼に必要な酸素量との比を表す。ステーシング比率はバーナ 1 基あたりの酸化剤流量のうち酸素ノズル側への分配比率を表す。燃焼量は 2 基合計で 100kW とし、それぞれ 30 から 70kW で 5kW 刻みの値を取りうる条件とする。バーナ 1 の燃焼量を可変としてバーナ 2 の燃焼量は従属的に決定する。酸素比はバーナ 1 の酸素比を 0.8 から 1.2 まで 0.02 刻みで可変とし、全体で酸素比が 1.02 となるようにバーナ 2 の酸素比を算出する。ステーシング比率は各バーナで独立に設定する条件であり、0.3 から 0.8 で 0.05 刻みとする。これら 4 つの独立変数と 2 つの従属変数の合計 6 つの変数を説明変数として、取りうる組合せは 22869 通りである。目的関数は排ガス中の NO モル分率とし、これを最小化する説明変数の組合せを探索する。実測の環境を考慮し、水分を除去したドライガス中の NO モル分率を採用した。

最適化の流れを Fig.3 に示す。まず初期データ 5 点を用意し(Table3), 各条件で流体解析を実行して結果を取得する。続いて得られたデータを用いてガウス過程帰帰モデルを構築し、獲得関数を用いて未実施の候補の

中から次の 1 点を選定する。選定した条件の流体解析を実行してデータを追加し、モデルの再構築と次点の選定を繰り返す。初期データの生成以降は研究者の意思が介在しないデータ駆動のサイクルにより探索を進める。本開発では終了判定には明確な判定基準は設けず、結果を確認しながら合計 25 条件で終了させた。

Table 2 Variables

Type	Variables
Input variables	Heat input from burner1
	Heat input from burner2
	Oxygen ratio of burner1
	Oxygen ratio of burner2
	Staging ratio of burner1
	Staging ratio of burner2
Objective function	NO (dry gas of flue gas)

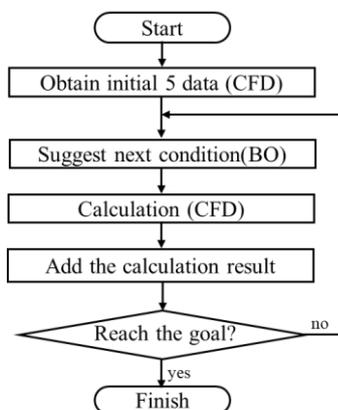


Fig.3 Flowchart of Bayesian optimization

Table 3 Initial 5 conditions

Case No.	Burner1			Burner2		
	Heat input [kW]	O ₂ ratio [-]	Staging ratio [-]	Heat input [kW]	O ₂ ratio [-]	Staging ratio [-]
1	50	1.02	0.5	50	1.02	0.5
2	50	1.02	0.7	50	1.02	0.7
3	40	1.02	0.5	60	1.02	0.5
4	50	0.86	0.75	50	1.18	0.75
5	50	0.92	0.75	50	1.12	0.75

3.3 結果と考察

初期データ 5 条件のうち、Case1 に関して火炎外観を把握するため温度のボリュームレンダリングによる可視化を行った (Fig.4)。また同条件のバーナ 1 およびバーナ 2 の中心における垂直断面の温度分布を Fig.5 に示す。炉内は火炎部を除くと概ね 1450°C から 1550°C の温度域であり、2 重管バーナから噴出したガスの燃焼により高温部を形成することが確認できる。同様に Case2 における各バーナの垂直断面の温度分布を Fig.6 に示す。ステーシング比率が 0.5 の Case1 と比較して、0.7

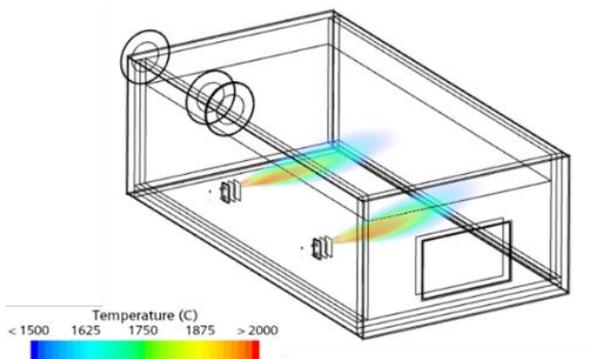


Fig.4 Flame appearance by volume rendering of temperature

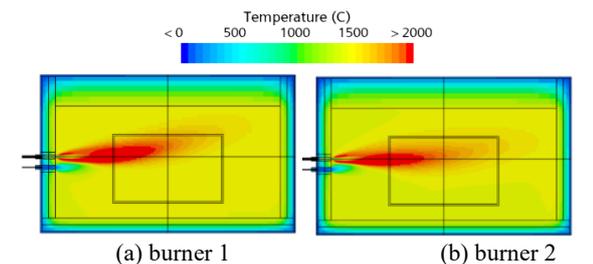


Fig.5 Temperature distribution of case1

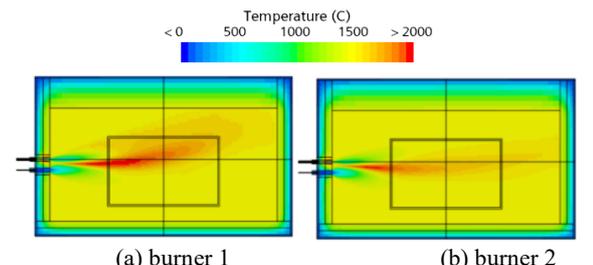


Fig.6 Temperature distribution of case2

の Case2 では 2 重管バーナにより形成される高温部が小さく、酸素ノズルから供給される酸化剤との合流部で燃焼が進むことで、全体的に局所的な高温部が抑制されている。これはステーシング構造の設計思想に合致しており、排ガス中の NO についても Case1 で 2905ppm であるのに対し、Case2 では 1833ppm と低下している。絶対値については解析モデルに起因して実測よりも大きい可能性があるが、相対比較として適切に傾向を捉えられていると判断し、本モデルを用いて以降のデータ取得を進めた。

計算結果の一覧を Table4 に示す。初期データ 5 条件に続き、合計 25 条件まで探索を実施した。Fig.7 に各試行で得られた NO 値と、その時点までの最良値の推移を示す。初期データの時点で 1380ppm と概ね良好な結果が得られていたが、その後 15 条件目で 1270ppm と最良値を更新した。この最良条件では、各バーナの酸素比はそれぞれ 0.82 と 1.22 であり、当初の想定通り、

バーナ毎に酸素比を変えることで、酸素比を固定していた従来の運転方法よりも NO を低減できることが示された。また、このときのステーシング比率も 0.65 と 0.80 とバーナ毎に異なる設定である。実機での再現性については今後の検証が必要だが、手動で条件設定する際には同一の比率にすることが多いため、非直感的な条件が提案され、その数値上の効果が確認できた点はデータ駆動型最適化の特長をよく示す成果である。

Table4 Calculation result

No.	Burner1			Burner2			NO [ppm]
	Heat input [kW]	O ₂ ratio [-]	Staging ratio [-]	Heat input [kW]	O ₂ ratio [-]	Staging ratio [-]	
1	50	1.02	0.5	50	1.02	0.5	2905
2	50	1.02	0.7	50	1.02	0.7	1833
3	40	1.02	0.5	60	1.02	0.5	2329
4	50	0.86	0.75	50	1.18	0.75	1380
5	50	0.92	0.75	50	1.12	0.75	1650
6	50	0.8	0.7	50	1.24	0.75	1340
7	50	0.8	0.8	50	1.24	0.7	1580
8	50	0.8	0.8	50	1.24	0.8	1450
9	50	0.8	0.75	50	1.24	0.8	1380
10	50	0.82	0.55	50	1.22	0.8	1360
11	50	0.82	0.45	50	1.22	0.75	1520
12	50	0.82	0.65	50	1.22	0.75	1340
13	55	0.84	0.7	45	1.24	0.75	1420
14	45	0.8	0.65	55	1.2	0.8	1380
15	50	0.82	0.65	50	1.22	0.8	1270
16	45	1.16	0.8	55	0.906	0.75	1570
17	55	1.12	0.6	45	0.898	0.8	2360
18	35	1.12	0.8	65	0.966	0.7	1780
19	45	1.2	0.8	55	0.873	0.65	1740
20	40	1.14	0.5	60	0.94	0.75	1960
21	50	0.84	0.65	50	1.2	0.8	1280
22	55	0.88	0.65	45	1.191	0.8	1510
23	40	0.88	0.6	60	1.113	0.75	1690
24	65	0.8	0.45	35	1.429	0.8	1446
25	55	0.8	0.6	45	1.289	0.8	1420

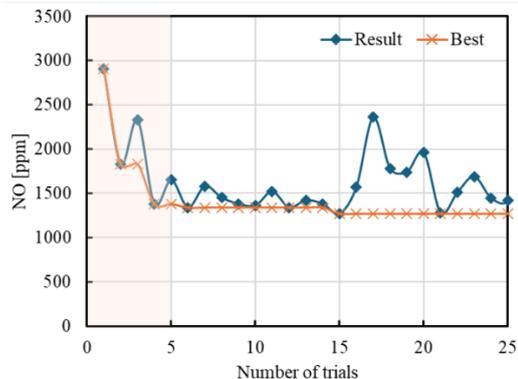


Fig.7 Optimization progress

4. 実測による実証

4.1 試験設備と試験条件

数値シミュレーションでベイズ最適化の有効性が確認できたため、実測による実証を行った。Fig.8 に使用した試験炉の外観を示す。シミュレーションで模擬した炉であり、バーナ構造も同様のステージング型であるが、実証試験では4基のバーナを設置した。試験炉の天井には複数の熱電対を設置しており、天井内表面の温度分布を取得可能である。排ガスは煙道から一部を抽出して、連続式分析計によりNOxを含む各種ガス組成を計測する。Table5に主要な実験条件を示す。燃料には天然ガスを用い、酸化剤には純O₂と純N₂を混合したO₂93 vol%のガスを用いた。バーナ1から3までは、燃焼量を20から34kWの5段階、酸素比を0.8から1.2までの5段階で調整した。4基合計の燃焼量が96kW、酸素比が1.0となるように、バーナ4の燃焼量と酸素比を従属的に決定した。ステージング比率は各バーナで独立に設定し、0.5から0.8までの4段階とした。以上のバーナ4基で合計12種類の説明変数を定義し、合計624128通りの組合せの中から、排ガス中のNOx濃度が小さくなる組合せを探索した。運用は数値シミュレーションと同様に、事前に設定した初期データ5条件 (Table6) を実測した後、ベイズ最適化によるサイクルを回した。

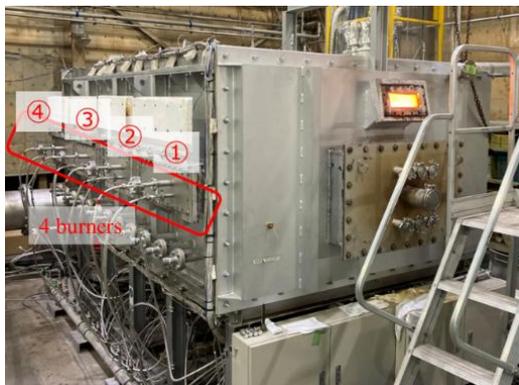


Fig.8 Experimental furnace

Category	Condition
Burner type	Pipe-in-pipe + Staging nozzle
Burner number	4
Fuel	Natural gas
Oxidizer	O ₂ 93vol% + N ₂ 7vol%
Heat input [kW]	20, 24, 27, 31, 34 (Total is 96kW)
Oxygen ratio [-]	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 (Total is 1.0)
Staging ratio [-]	0.5, 0.6, 0.7, 0.8

Case No.	1	2	3	4	5	
Burner1	Heat input [kW]	24	20	20	20	20
	O ₂ ratio[-]	1.0	0.9	0.8	1.2	1.2
	Staging ratio[-]	0.8	0.5	0.6	0.7	0.5
Burner2	Heat input [kW]	24	24	20	20	31
	O ₂ ratio[-]	1.0	0.8	1.1	0.9	0.9
	Staging ratio [-]	0.8	0.7	0.5	0.5	0.7
Burner3	Heat input [kW]	24	20	34	24	20
	O ₂ ratio[-]	1.0	1.2	1.1	0.8	1.0
	Staging ratio [-]	0.8	0.5	0.7	0.6	0.7
Burner4	Heat input [kW]	24	32	22	32	25
	O ₂ ratio[-]	1.0	1.09	0.94	1.09	0.96
	Staging ratio [-]	0.8	0.5	0.6	0.5	0.7

4.2 試験結果

初期データの内 Case1 は標準条件であり、バーナ4基全て、燃焼量24kW、酸素比1.0、ステージング比率0.8の条件である。これは従来の調整手法で選定される代表的な条件設定である。Case1の天井内表面の温度は1300℃から1400℃、平均1353℃であり (Fig.9)、流体解析で想定していた温度よりも100℃以上低い。このため排ガス中のNOxは157ppmと低い値を示した。

標準条件を含む5条件を初期データとして、ベイズ最適化によるサイクルを進めた結果を Fig.10 に示す。初期データですでに低いNOx値を得られていたが、その後、更に Case15 で最良値75ppmを達成した。前節に比べて総組合せ数が飛躍的に多くなったにも関わらず、少ない試行回数で有望な条件に到達することができた。

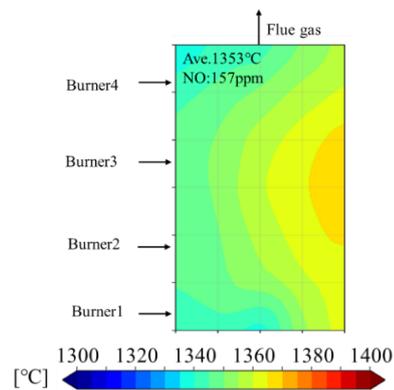


Fig.9 Temperature distributions on roof surface (Case1)

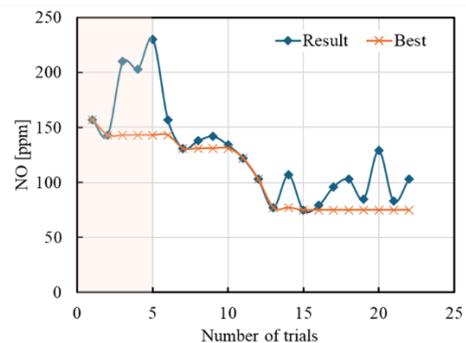


Fig.10 Optimization progress in experiments

標準の Case1 に加えて、NOx が高い値を示した Case5 および最良値を示した Case15 について、NOx 値と各種条件を Table7 示す。また Case5 および 15 における、天井内表面の温度分布を Fig.11 に示す。Case5 では煙道に対して上流側のバーナ 1 が酸素過剰であり、続くバーナ 2 の燃焼量が最大となる組合せである。その結果、天井温度の極大値は上流側に現れ、そこで生成した NOx が煙道での排出濃度に大きく影響したと考えられる。一方で Case15 では、上流側のバーナ 1 および 2 で燃料過剰であり、炉の下流側で酸素過剰として完全燃焼させる設定である。ステージング燃焼を炉全体で実現する状況であり、このため NOx 生成が大きく抑制されたと考えられる。

以上より、十分に妥当性のある運転条件に、ベイズ最適化のサイクルのみを用いて自律的に到達できた。操業最適化手法として確立できたことに加え、将来的な自動化に向けても有望な結果である。

Table 7 Typical results

Case No.		1	5	15
	NOx[ppm]	157	230	75
Burner1	Heat input [kW]	24	20	24
	O ₂ ratio[-]	1.0	1.2	0.8
	Staging ratio [-]	0.8	0.5	0.8
Burner2	Heat input [kW]	24	31	20
	O ₂ ratio[-]	1.0	0.9	0.8
	Staging ratio [-]	0.8	0.7	0.8
Burner3	Heat input [kW]	24	20	20
	O ₂ ratio[-]	1.0	1.0	1.2
	Staging ratio [-]	0.8	0.7	0.8
Burner4	Heat input [kW]	24	25	32
	O ₂ ratio[-]	1.0	0.964	1.15
	Staging ratio [-]	0.8	0.7	0.8

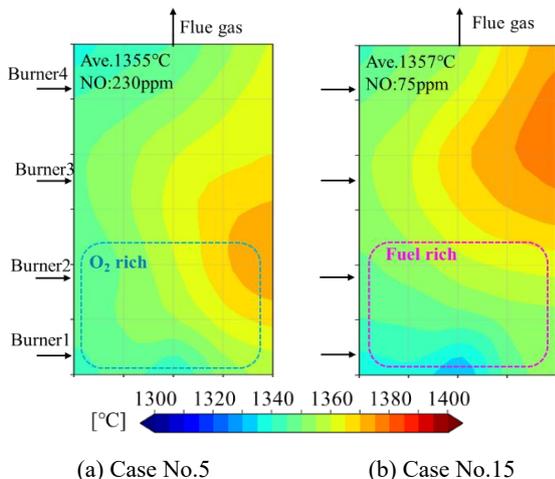


Fig.11 Temperture distributions on roof surface (Case5, 15)

5. 結言

本開発では、複数基の酸素バーナの運転条件最適化に対するベイズ最適化の適用に関して、数値シミュレーションを用いて有効性を確認した後、実証試験を実施した。

数値シミュレーションによる検証では、排ガス中の NOx 濃度の最小化を目的として、データ駆動による条件提案と結果の取得を繰り返すことで、少ない試行回数により従来の調整方法では達成できない NOx 低減を実現できた。ステージング比率に着目すると、2 基のバーナで比率の異なる条件にて NO が最小となっており、これは通常運転では選択されない条件であり、ベイズ最適化の有用性が示された。

続いて実測による実証評価では、バーナ 4 基で総組合せ 624128 通りと、さらに多いパラメータに対して効果を検証し、少ない試行回数で NOx をより一層低減する条件を探索できた。

以上より、酸素バーナの運転条件の最適化手法として活用できる技術を構築できた。今後は本結果を元に社内での活用を進め、大規模な炉を想定した多量な説明変数への対応や複数の目的関数の同時最適化など、ベイズ最適化アルゴリズムの改良についても検討を進めていく。本技術は作業効率を大きく改善する可能性を有しており、また数値シミュレーションと組み合わせることで、実機への導入前に最適な運転パターンの検討が可能となる。最終的には実機の制御装置と連動させることで、自動自律型の最適化制御として機能するように発展させることを目指す。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人国立環境研究所, 日本の温室効果ガス排出量データ (2022 年確報値), 2024
- 2) 小林伸明, 大陽日酸技報 No.40: 1-13, 2021
- 3) 萩原義之, 山本康之, 日本燃焼学会誌 67:26-33, 2025
- 4) B. Shahriari, K. Swersky, Z. Wang, R. P. Adams and N. de Freitas, Proc. of the IEEE, vol. 104, 1, 148-175, 2016
- 5) 今村秀明, 松井考太, ベイズ最適化 適応的実験計画の基礎と実践, 2023
- 6) Balandat, M., Karrer, B., Jiang, D. R., Daulton, S., Letham, B., Wilson, A. G., & Bakshy, E., NeurIPS, 2020