

エネルギー最有利運用探索システム

Nelder-Mead 法による高炉最適操業条件の探索

和田浩爾・木原久継・高橋敏夫・小林洋一・松本清司・川辺英夫

1. はじめに

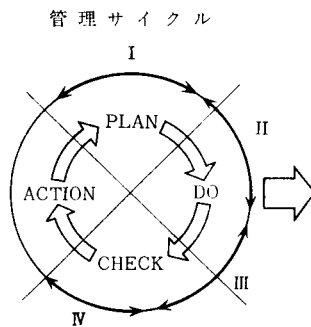
昨今のエネルギー価格の高騰，量的制約，利用面での多面的な評価など，製鉄所をとりまくエネルギー環境は，ますます急激に変化しようとしている．このような時代においては，積極的な省エネルギー技術の開発，省エネルギー機器の導入等を進めることは

もとより，効率的なエネルギー利用の側面からソフトによる総合的なエネルギー管理へのアプローチの重要性がますます高まりつつある．総合的なエネルギーの管理を管理サイクルとシステム機能の面から整理すると，図1のように整理することができる．

すなわち，中長期的なエネルギー計画機能（システムⅠ），直近のエネルギー効率運用（実行）計画機能（システムⅡ），時々刻々の変化に対する最適操業の決定とコントロール機能（システムⅢ），エネルギー実績の集中管理機能（システムⅣ）である．

エネルギー最有利運用探索システムは，中長期的エネルギー計画を狙いとする鉄鋼プロセスの最

わだ こうじ，きはら ひさつぐ，たかはし としお，こばやし よういち，まつもと きよし，かわべ ひでお 新日本製鉄 堺製鉄所



システム機能		システム運用レベル
Ⅰ	●最適操業条件探索 ●エネルギー需給計画	月次レベル以上
	●エネルギー需給時系列予測 ●エネルギー設備最適稼働計画	日，シフトレベル
Ⅲ	●オンラインコントロール ●エネルギーデータロギング	実操業レベル
	●エネルギー実績値集中管理 ●各種統計解析	実績管理

図1 エネルギー管理サイクルとシステム機能

適操業条件の探索および各プロセスの最適操業条件下でのエネルギー需給計画策定システムで構成される．以下に述べる内容は製鉄所内のエネルギーの6割を占める高炉に主眼をおいて，Nelder-Mead法によるエネルギーミニマム（コストまたはカロリー）となる高炉最適操業条件の探索についてである．

従来，高炉操業モデルとエネルギー最適配分モデルを単一モデルに組み込み，Taylor展開，重回帰式等により，特定高炉操業点で線形近似した後LP手法により最適操業条件を求めるものであった．しかし，線形計画法の主要な欠点は，本来非線形モデルである高炉モデルを特定操業点で線形近似することである．実際には，特定操業の近傍の操業範囲内での最適解の探索に限定されてしまう．さらに高炉の操業度，操業方法およびエネルギー需給構造が変化した際には，改めて特定操業

点での線形近似を行なわなければならない、モデルの柔軟性に欠ける。そこで、このシステム開発のポイントの1つは、特に高炉操業式を加工することなく使える操業条件の探索手法の開発、すなわちNelder-Mead法の適用であった。

2. 高炉最適操業条件探索へのNelder-Mead法の適用

Nelder-Mead法とは

Nelder-Mead法とはどのような手法であるか概略説明を行なう(図2)。

独立変数 x_1, \dots, x_n を変数とする目的関数 $f(X)$ を $l_j \leq x_j \leq u_j$ $j=1, \dots, m$ ($n < m$) の形で m 個の制約条件下で最小化する問題を考える。ただし、 x_{n+1}, \dots, x_m は独立変数の関数であり、制約条件の上下限 u_j, l_j は定数である。すなわち、

$$\min_{x_1, \dots, x_n} f(x_1, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$\text{subj. to } l_j \leq x_j \leq u_j \quad j=1, \dots, n \quad (2)$$

$$l_j \leq x_j \leq h_j(x_1, \dots, x_m) \leq u_j \quad j=n+1, \dots, m \quad (3)$$

Nelder-Mead法の中心的な考え方は、図3に示

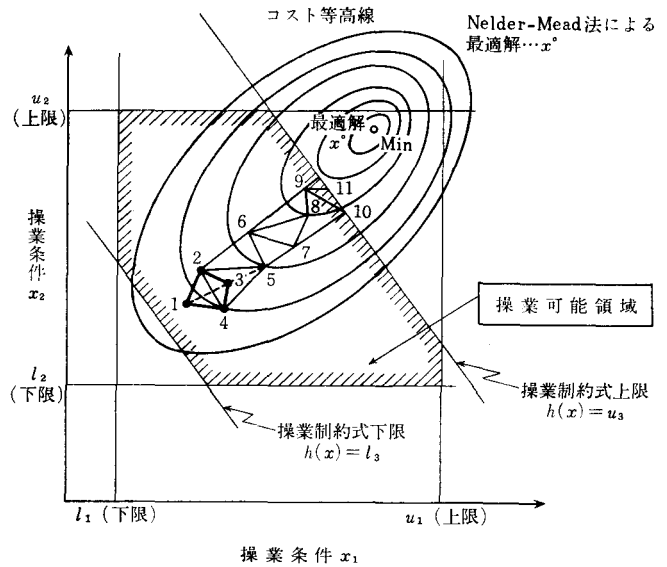


図2 Nelder-Mead法による最適化

すごとく、 $n+1$ 個以上を頂点とするシンプレックス(幾何学的図形)を作り、このシンプレックスの頂点の中で最悪の目的関数値(図の中の1)をとる点の残りの頂点(図の中の2, 3, 4)の中心に関する鏡映点(図の中の5)は目的関数値を改善させることが期待できるという考え方をとり、またこの鏡映プロセスの他に目的関数の形状に応じて伸長、収縮、縮小などの修正動作を加えて最適解の探索を行なう手法である。

この手法は、

- (1) 最小化すべき目的関数 $f(x_1, \dots, x_n)$ を変数 x_1, \dots, x_n の関数形として明確に定義する必要がなく
- (2) 目的関数の局所的な最小化方向を与える偏微分係数なども計算する必要もなく、ただ任意の変数 x_1^i, \dots, x_n^i に対応した目的関数値 f^i だけを算出、利用して最適点を探索できる利点も持っている。

高炉最適操業条件探索へ

評価エネルギー	電力		ガス系(最経済配分)		インプットエネルギー	インプットエネルギー
	インプットエネルギー	アウトプットエネルギー	インプットエネルギー	アウトプットエネルギー		
高炉操業諸元						
BFG発生量 BFG発生カロリー 熱風炉所要熱量 ・ Mixガスカロリー			○	○		
送風量 送風湿分 吹込N ₂ , O ₂	○		(蒸気発生量)	各プロセスのBFG使用量		
炉頂圧発電		○	CDG, LDG, LNG			
コークス比					○	
OiL比						○

図3 高炉系エネルギー評価(目的関数)

の適用に当っては独立変数 x_1, \dots, x_n に高炉操業条件（送風温度，送風湿分，吹込重油，吹込酸素等），制約条件 $h_j(x_1, \dots, x_n)$ にボッシュガス量，羽口先温度，炉芯温度，目的関数は高炉操業条件 x_1, \dots, x_n をパラメータとして計算される高炉操業諸元(図3)を評価すべきエネルギーにおきかえ，高炉操業に影響されるエネルギーとして，目的関数（高炉エネルギー）=高炉インプットエネルギー（コストまたはカロリー）-高炉アウトプットエネルギー（コストまたはカロリー）である。

次に Nelder-Mead 法の手順について述べる。最初に記号を以下のように定義する。

X^K : シンプレックスの頂点 K の座標 (X_1^K, \dots, X_n^K)

X^L, f^L : シンプレックスにおける目的関数の

最大点および X^L における $f(X)$ の値

X^H, f^H : シンプレックスにおける目的関数の 2

番目の最大点および X^H における $f(X)$ の値

X^S, f^S : シンプレックスにおける目的関数の最小点および X^S における $f(X)$ の値

X^G, f^G : 最悪点 X^L を除いたすべての頂点の中心および X^G における $f(X)$ の値

シンプレックスの初期配置

シンプレックスの頂点の数は $K=2n$ と多目にとる。 m 個のすべての制約条件を満たす初期点 (X_1^0, \dots, X_n^0) は実行可能な高炉操業条件（たとえば現状の操業条件）を与え，残りの $(K-1)$ 個の点は一様乱数を用いて $X_j = l_j + r_j(u_j - l_j)$ $j=1, \dots, m$ によって決める。

K 個の高炉操業条件の $X^i (i=1, \dots, K)$ が選ばれた後，図4に示すように，まず原料条件，生産量，エネルギー原単位等と与件条件として，高炉操業モデルより X^i に対応した高炉操業諸元を算出する。この時，ボッシュガス量，羽口先温度，炉芯温度の制約値，BFG 発生量，BFG 生ガスカロリー，熱風炉所要熱量，燃料比，炉頂圧発電量が算出される。

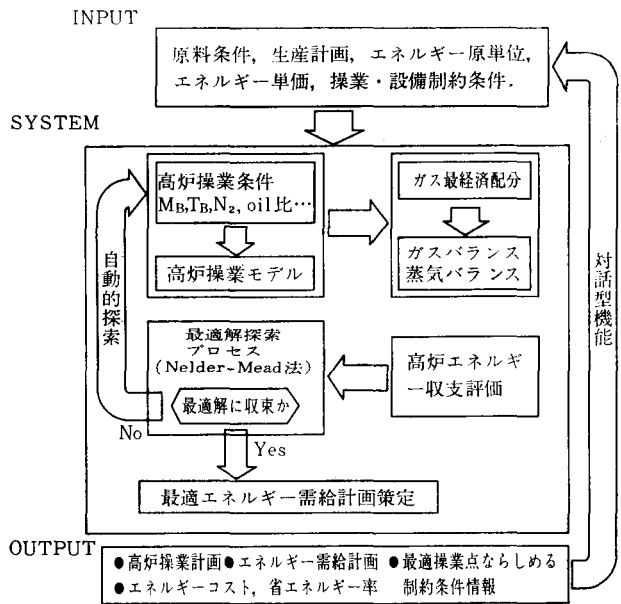


図4 システム構成

次に高炉操業諸元と与件条件からエネルギー最適配分モデルを用いて，エネルギー最経済配分を行なう。エネルギー最適配分モデルは，各工程の熱設備の所要熱量を満足し，かつ設備制約条件，燃料使用枠等を満足する中でガス系高炉インプットエネルギーと自家発生エネルギー（BFG）の使用量を最経済的に決定するものである。こうして全体のエネルギーバランスが算出された後（高炉インプットエネルギー-高炉アウトプットエネルギー）のエネルギー収支を計算する。

初期配置の K 個の操業条件 $x^i (i=1, \dots, K)$ に対応する目的関数としての消費エネルギーのコストあるいはカロリー $f^i (i=1, \dots, K)$ を求める。

シンプレックスの更新

(i) シンプレックスの各頂点で目的関数値を比較して，最悪点 X^L を除き残りの頂点の中心 $X^G = 1/(2n-1) \cdot \sum_{K=1, K \neq L}^{2n} X^K$ に関して $X^G = (1+\alpha)X^G - \alpha X^L$ (鏡映係数 $\alpha > 1$) により鏡映させ X^K を求める。鏡映によって得られた試点 X^K の目的関数 f^K が f^S, f^H, f^L と比較してどこに分類されるか，ならびに制約条件を考慮してシンプレックスの伸長，収縮，縮小のいずれかの修正動作をとる

かを定める。

(ii) $f^K \leq f^H$ の場合

X^K が新しいシンプレックスで最悪点にならない場合であるので X^K が操業可能域にあるかどうかを判定する必要がある。 X^K が操業条件自体の上下制限約を侵害しているかどうかを判定し、侵害していない場合には X^K に対応するボッシュガス量、羽口先温度、炉芯温度の制約条件を侵害しているかどうかを判定し、同時に制約条件を満足していれば許容点とする。

X^K が許容点のとき：

① $f^S < f^K \leq f^H$ のとき X^L の代りに X^K を採用し探索を続ける。

② $f^K < f^S$ のとき X^K が新しいシンプレックスで最良点であるから、その方向で一層の改善が期待できる。 $X^E = (1+\gamma)X^Q - \alpha X^L$ (伸長係数 $\gamma > 1$) によって伸長する。伸長点 X^E における目的関数 f^E を計算する。 $f^E < f^K$ かつ X^E が許容点のとき、 X^L の代りに X^E をとり、他の場合は、 X^L の代りに X^K を採用し探索を続ける。

X^K が許容点でないとき：

③ X^K が高炉操業制約上下限を満足しないならば、その独立変数 x_j^K を適当な量(たとえば、上限-0.01, または下限+0.01) だけ操業可能域にリセットする。

④ ボッシュガス量、羽口先温度、炉芯温度を満足しないならば X^K を中心 X^Q の方向へ収縮率 1/2 で3回までもとし、許容点 X^{Kf} を見つける。

それでも許容点が得られないならば、 X^Q で許容かを判定する。なお許容点でないならば、 $dX = (X^L - X^Q)/10$ を計算し、 dX ずつ2回 X^Q 方向に探索する。その点でも許容でないならば、シンプレックスを X^S に向かって1/2 ずつ移動させる。

(iii) $f^H < f^K$ の場合

① $f^L \leq f^K$ のとき

行きすぎた X^K をもどすのだが $f^L \leq f^K$ より、 X^L 側の内分点のほうがより小さい目的関数を与えることが期待できるので $X^Q = \beta X^K + (1-\beta)X^Q$

(収縮率 $0 < \beta < 1$) によって X^L 側へ収縮を行なう。

X^Q が許容点のとき： X^Q における目的関数値 f^Q を計算する。

・ $f^Q < f^L$ のとき： X^L の代りに X^Q を採用する

・ $f^Q \geq f^L$ のとき：すべての頂点 X^K を X^S に向かって1/2 ずつ移動させて縮小したシンプレックスを作る。

X^Q が許容点のとき：非許容域をシンプレックスを包んでいる場合でシンプレックスを制約域の形状にあった適当な大きさに縮小する。

② $f^K < f^L$ のとき

$f^L > f^K$ であるので、 X^K 側の内分点にもどすほうが目的関数値の改善が期待できるので $X^Q = \beta X^K + (1-\beta)X^Q$ によって X^K 側へ収縮を行ない X^Q を求める。

X^Q が許容点のとき：(iii) の①と同様の処理を行なう。

X^Q が許容点でないとき：(ii) のところで述べた許容化アルゴリズムを用いて X^{Qf} を見出し、 X^L の代りに採用する。

収束判定条件

シンプレックスの各頂点の目的関数値 $f(X^K)$ の標準偏差が ϵ 以下になったとき最適点に収束したと考える。

$$\bar{f} = 1/2n \sum_{K=1}^{2n} f(X^K) \quad 1/2n \sum_{K=1}^{2n} [(f(X^K) - \bar{f})^2]^{1/2} < \epsilon$$
ただし ϵ は問題に応じて適当に定める。

3. システムの活用例

高炉におけるコストミニマム操業点の探索 (図5, 6)

高炉の生産量、原料条件を与件とし、重油吹込=0(オールコークス操業)、 N_2, O_2 吹込=0、炉内制約をボッシュガス量、羽口先温度、炉芯温度のもとで、高炉コストミニマムを目的関数として、高炉系コストの推移と操業条件である送風温度、送風湿分を求めた。

それによると、送風温度を設備下限まで下げ、

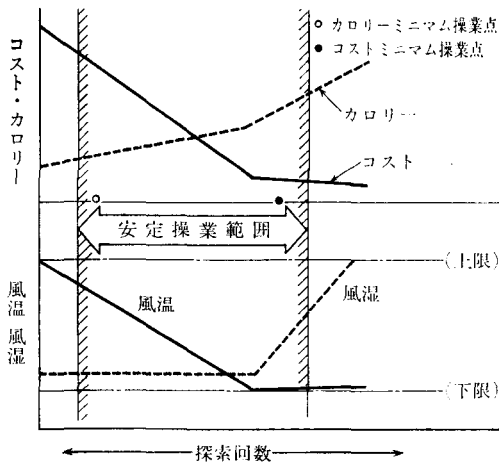


図5 最適高炉操作条件

かつ送風湿分を設備上限まで上げることがエネルギーコスト削減のためには最適な操作手段であることを示している。

一方、送風温度、送風湿分のコストまたはカロリーに対する寄与度をみると、送風温度低下、送風湿分増加がともに省コストに寄与し、コスト寄与度は送風温度低下が大きい。しかしエネルギー的にはともに増エネとなる。

図5中、送風温度を下限にはりつけた後、送風湿分を増加させているのはこのためである。(ただし送風湿分のコスト、カロリーに対する寄与度は与件条件の設定によって変動する要素もっている)

4. おわりに

前述したように高炉最適操作条件の探索を中心に述べたが、実際のシステムでは高炉最適操作条件下での最経済エネルギー需給計画を同時に策定できるシステムになっており、月次の高炉操業計画値、エネルギー需給計画の作成等に運用している。

従来、中長期的な計画作成システムはバッチ処理が一般的であったが、システムユーザー部門に端末機を設置し、中央計算機と回線で接続した対

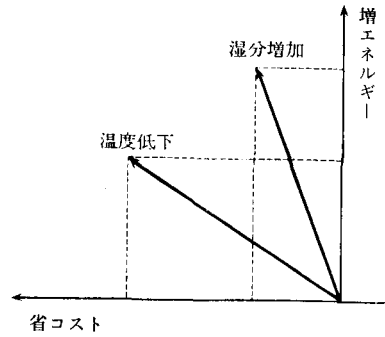


図6 送風温度、送風湿分のコスト、カロリーに対する寄与度

話処理 (TSS) の導入を計っている。端末機にはグラフィックディスプレイを導入し図形処理機能を付加した。

参考文献

志水清孝「システム最適化理論」コロナ社1976, pp.92-99

次号予告

トップの視点

ビジネススクールとOR……………阿部栄司

特集 スーパーコンピュータ

スーパーコンピュータの現状と展望

……………堀越 彌・長島重夫

LSIのデザインオートメーションへの応用

……………反町洋一

連続体力学と PISCES コード

……………片山雅英

フォーラム

ORのはじまり……………茅野 健