発電用石炭だきボイラの制御のための適応状態推定システム

正員 深山 幸穂 (バブコック日立) 正員 平澤 宏太郎 (九州大学)
非会員 村上 義雄 (バブコック日立) 非会員 津村 俊一 (バブコック日立)

Adaptive State Estimator for Coal-fired Boiler Control at Power Stations

Yukio Fukayama, Member (Babcock-Hitachi) Kotaro Hirasawa, Member (Kyushu University)
Yoshio Murakami, Non-member (Babcock-Hitachi) Toshikazu Tsumura, Non-member (Babcock-Hitachi)

Recently various kinds of coals which have, for example, heavy slagging or slowly burning properties are required to be fired in boilers at power stations. In addition, large capacity coal fired boilers shall not be exceptions to the frequent load swinging duties in the near future. The key to complying the requirement is the boiler controlling technique adaptive to the coal grindability, burning profile and the thermal conductance through the slagging. Thus, an advanced boiler controlling technique, which is coping with the dispersion in the coal characteristics, being considerable even though from the same mine, and the fluctuations in the thermal conductance through the slag adhering to and coming off the boiler heating surfaces has been developed and applied to a 1000MWe thermal power station. In this report, not only an outline of the newly developed controlling technique which features the pulverizers dynamics model and the acoustic gas temperature measurement but also validations of its accuracy and usefulness are introduced.

キーワード：火力発電，状態推定，粉砕機，キユムラント，ガス温度計測，M系列

1. 緒 論

〈1.1〉はじめに 本論文では粉砕性，燃焼速度，灰の含有量等，石炭性状の影響による石炭粉砕機出口微粉炭流量と火炉出口ガス温度への外乱に対処するための適応状態推定に関する研究について述べる。本論文では，当該適応状態推定の実施形態として「新開発の微粉炭粒度分布パラメライズ法を用いた非線形動特性モデル，これを用いた石炭粉砕機制御サブシステム」と「炉内送出波形と信号処理法を改良した音波式ガス温度計，これを用いた火炉制御サブシステム」とを特徴とするボイラ制御システムを提案し，これを適用したボイラ制御システムの大型発電用ボイラでの稼動実績から本提案の妥当性を示す。

〈1.2〉火力発電用ボイラ制御技術の発展 火力発電プラントの中間負荷運用では熱効率やタービン熱応力等の観点で変圧運転が有利であるため，1980年代より石油・ガスだきを中心に変圧貫流ボイラが主流になっている。近年，石炭だき大容量変圧貫流ボイラの増加が著しく，その制御法として石油・ガスだき変圧貫流ボイラで確立された手法を基本に，いわゆる炭種コード制御（使用炭種銘柄の代表性状に応じて制御設定値を調整）⁽²⁾が採用されてきた。しかしながら，昨今の石炭だきボイラの中間負荷運用性能高度化にあたり，プラント特性パラメータ変動に起因する高速負荷変化時の蒸気温度変動低減を要し，新たな制御技術が求められて

いた。

図1 石炭性状のばらつきの例
Fig.1 Dispersion in Coal Characteristics

例えば図1に代表的な炭種銘柄の無作為サンプルについて粉砕性 (HGI: ハードグループ指数) や燃料比分析値の「ばらつき」状況を示すとおり，同一銘柄の石炭における粉砕速度 (HGI に依存) や燃焼速度 (燃料比⁺ に依存) の変動が知

⁺ 燃料比: 石炭性状分析値の固定炭素と揮発分の比。この値が小さいほど燃焼速度大でバーナ近傍のガス温度高となる。

られている。さらに石炭だきボイラでは伝熱面汚れの進行、剥離の影響も加わって、これらの特性パラメータ変動は高速負荷変化時の蒸気温度変動をもたらす。しかしながら図2下段の炭種コード制御（使用銘柄の代表性状に基づく）では、このようなランダムな特性パラメータ変動への速応的な対処は困難である。

本研究では石炭だき変圧貫流ボイラの中間負荷運用性能高度化に向け、適応状態推定の手法に基づいて、石炭性状、伝熱特性変動に対処する制御システムの開発を行った。本システムは、具体的に次節に述べるアプローチにより高速負荷追従性およびプラント特性パラメータ変動に対する安定性向上をめざす。

<1.3> 適応状態推定の位置づけ 本研究による発電用石炭だきボイラ制御システムは図2上段に示すとおり、石炭粉砕機制御サブシステムと火炉制御サブシステムより構成され、石炭だきボイラ特有の課題への対処にあたり、いわゆる炭種コード制御の限界を以下のとおり克服する。

図2 適応状態推定機能を備えたボイラ制御装置

Fig.2 Adaptive Controller with State Observer for Coal Fired Boilers

石炭粉砕機制御サブシステムは<5.1>に構成を示すとおり、2節のオンライン稼働に好適な粉砕機の高速動特性モデルを用いて、燃料供給系に係わる技術的課題に対処する。すなわち石炭だきボイラでは粉砕機出口（バーナ入口）微粉炭流量、同粒度分布はオンライン計測が困難であり、これらは石炭粉砕機を介して調節されるため応答遅れが大きい。また、その応答遅れ時定数は石炭粉砕性の影響を受けて大きく変動（石炭粉砕機給炭量に対する同出口微粉炭流量の応答の場合、時定数は数10秒から数分程度の幅となる⁽²⁾）する。これは石油・ガスだきボイラ（燃料は物理的に均質、バーナ入口の流量をオンライン計測可能、かつ、これを弁またはダンパ操作で目標値に即応可能）とは全く対照的な性質である。従って石炭粉砕機制御サブシステムでは、これらの技術的課題への対処にあたり、動特性モデルに基づいてバーナ入口微粉炭流量、同粒度分布を推定、及び、石炭粉砕性等を同定して制御に反映させるアプローチをとる。

火炉制御サブシステムは<5.2>に述べるとおり、内蔵のボ

イラ（火炉、水壁、過熱器）動特性モデル、及び、3節の炉内送出波形・受信信号処理方式（非定常状態の計測精度を向上）による音波式ガス温度計測を用い、火炉系に係わる技術的課題に対処する。すなわち石炭だきボイラでは火炉系においても石油・ガスだきの場合（燃料の化学性状ほぼ一定、伝熱面の汚れも相対的に小さい）とは対照的に石炭燃料比や水壁の汚れ状況により火炉内の燃焼・伝熱特性が影響を受けてガス温度特性が相違する。従って火炉制御サブシステムでは音波式ガス温度計測と動特性モデルにより、燃料比、伝熱面の汚れを同定、及び、火炉出口ガス温度特性を推定して制御に反映させるアプローチをとる。

なお、石炭粉砕機、火炉の両制御サブシステムにおける同定・状態推定機能では拡張カルマンフィルタを採用し、物理現象の記述が容易な連続時間の動特性モデル、及び、石炭性状等の未知パラメータの逐次変動を仮定している。本システムの拡張カルマンフィルタにおける仮定の詳細、及び、同定・推定の数値計算安定性向上（動特性モデルの演算を含む）については4節に紹介する。

2. プラントの動特性モデル

<2.1> 石炭粉砕機 図3に示す粉砕機において、給炭は後述の循環流と共にターンテーブル（混合プロセス）上で保有炭（蓄積）となり、順次、外縁近傍のローラ（粉砕プロセス）で粉砕される。粉砕後の石炭は搬送空気（ターンテーブル外縁より供給）で吹き上げられる一次分級（重力分級プロセス）、及び、二次分級（遠心分級プロセス）において粗粒が捕集されて混合機構へ落下（循環流）し、他方、微粉炭がバーナに供給される。すなわち、諸プロセスにおける粉体流量変化と粒度分布変化は相互に依存しており、動特性モデルは混合、粉砕、分級過程の粒度分布変化を忠実に、かつ、オンライン稼働実現に必須の低計算量で模擬する必要がある。なお、本モデルの詳細は既報⁽³⁾であり、以下に要点を述べる。

図3 粉砕機内における諸プロセス

Fig.3 Processes in Pulverizers

(1) 粉体粒度分布のパラメトライズ 本サブシステムでは、石炭の粒度分布密度関数 $g(\xi)$ を図4に示す4次までのキユムラント（平均 μ ，分散 σ ，非対称性 κ_3 ，裾の重さ κ_4 ）で記述する高速版粉砕機動特性モデルを採用している。すなわち、本モデルでは図3の諸過程の粒度分布変化をキユムラント4変数に集約して算出しており、粒度分布を30次程度の区間分割で記述する従来法の粉砕機動特性モデルに比して状態変数は7分の1の次数である。従って、計算時間は粒度分布の記述次数の概ね2乗に比例するため、これを約50分の1に低減できる。

図4 キユムラントによる分布の記述

Fig.4 Distribution Described with semi-invariants

本モデルにおいて、 $g(\xi)$ 概形の具体的表示を要する際は、4次までのキユムラントについて次のエッジワース展開を用いる。

$$g(\xi) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\xi-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} \left[1 + \frac{\kappa_3}{3!} H_3\left(\frac{\xi-\mu}{\sigma}\right) + \frac{\kappa_4}{4!} H_4\left(\frac{\xi-\mu}{\sigma}\right) + \frac{\kappa_3^2}{6!} H_6\left(\frac{\xi-\mu}{\sigma}\right)\right] \quad (1)$$

ここに、 ξ は対数スケールの粉体粒度、 $H_n(x)$ は次のエルミート多項式である。

$$H_3(x) \equiv x^3 - 3x, H_4(x) \equiv x^4 - 6x^2 + 3, \\ H_6(x) \equiv x^6 - 15x^4 + 45x^2 - 15 \quad (2)$$

(2) 粉砕プロセス 図3の粉砕機において、ターンテーブルの外周近傍はローラによる粉砕プロセスをなす。粉砕前後（それぞれ、添字 i ， o ）の粒度分布には、条件付確率密度 $g_{o|i}(\xi|\eta)$ を用いて次の関係とおける。

$$g_o(\xi) = \int g_{o|i}(\xi|\eta) g_o(\eta) d\eta \quad (3)$$

被粉砕物が石炭の場合、条件付確率密度は粉砕前後の対数粒径の差（粒径の比）のみの関数と仮定でき、これは粉砕分布定数 $g_p(\xi-x)$ と呼ばれる。この場合(3)式は、次式の重畳積分に帰着する。しかし、これを従来の区間分割法で数値計算すると多大な計算量となる。

$$g_o(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} g_p(\xi-x) g_i(x) dx \quad (4)$$

このとき、一般に確率密度関数 $g(\xi)$ を持つ確率変数 Ξ の期待値 $E\{e^{j\omega\Xi}\}$ は特性関数 $\phi_\Xi(\omega)$ と呼ばれて

$g(\xi)$ のフーリエ変換と類似の性質を持つため、密度関数の重畳積分は特性関数の積となる。さらに、 $\ln(\phi_\Xi(\omega))$ の $(j\omega/k)^k$ ($k=1,2,\dots$) を用いた級数展開係数は k 次のキユムラントにあたり、その和は密度関数の重畳積分に対応する。

具体的には、(1)式における μ ， σ ， κ_k は、それぞれ、 Ξ の1次、 $\Xi-\mu$ の2次、 $(\Xi-\mu)/\sigma$ の k 次キユムラントにあたる。従って、(4)式の重畳積分による密度関数のキユムラントは次の加算式で求められ、著しい計算量低減となる。

$$\begin{pmatrix} \mu_o \\ \sigma_o \\ \kappa_{3o} \\ \kappa_{4o} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu_i \\ \sigma_i \\ \kappa_{3i} \\ \kappa_{4i} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu_p \\ \sigma_p \\ \kappa_{3p} \\ \kappa_{4p} \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここに、添字 o ， i ， p は順に $g_o(\xi)$ ， $g_i(\xi)$ ， $g_p(\xi)$ のキユムラントを示す。

(3) 分級プロセス 粉砕機中の n 個の分級機構について、これを第 j 番目で代表させ、入口、循環（捕集）、出口（通過）の流量 Q ，粒度分布密度関数 $g(\xi)$ に、順に、添字 j ， r_j ， v_j を与えるとき、次の関係が成立する。

$$E\{Q_{vj}\} = r_j E\{Q_{vj}\}, E\{Q_{vj}\} = (1-r_j) E\{Q_{vj}\} \quad (6)$$

$$g_{vj}(\xi) = \frac{c_j(\xi) g_{vj}(\xi)}{r_j}, g_{vj}(\xi) = \frac{(1-c_j(\xi)) g_{vj}(\xi)}{1-r_j} \quad (7)$$

ここに、粒径 ξ 近傍の粒子が捕集される確率である部分分級効率 $c_j(\xi)$ ，および、循環比 r_j を定義した。

$$r_j = \int c_j(\xi) g_{vj}(\xi) d\xi \quad (8)$$

このとき、既報⁽³⁾に述べたとおり、本モデルでは $c_j(\xi)$ をガウス分布型関数の混合（重み付き重ね合せ）で近似し、 $g(\xi)$ の関数値を具体的に求めることなく、分級プロセスに係わる演算をすべてキユムラントで記述している。

(4) 混合プロセス 混合機構（添字 b ）において、分級機構 ($j=0,\dots,n$) からの循環流（添字 r_j ），給炭（添字 ib ）を混合、蓄積する際、粒径 $\xi < \Xi \leq \xi + \Delta\xi$ の粒子のマスバランス式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} E\{G_b\} g_{ob}(\xi) \Delta\xi \\ &= \left[\sum_{j=0}^n E\{Q_{vj}\} g_{vj}(\xi) + E\{Q_{ib}\} g_{ib}(\xi) - E\{Q_{ob}\} g_{ob}(\xi) \right] \Delta\xi \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 G は蓄積量である。

(9)式の両辺に $[(\xi-\lambda)/\varphi]^k$ ($k=0,1,\dots$) を乗じて $-\infty < \xi < \infty$ について積分すれば $Q_{vk}(\lambda, \varphi)$ ， $G_{vk}(\lambda, \varphi)$ についての微分方程式が得られる。ここに、 $v_k(\lambda, \varphi)$ は (λ, φ) で基準化した $g(\xi)$ のモーメントである。

ちなみに、 $E\{Q_{vk}(\lambda, \varphi)\}$ ， $E\{G_{vk}(\lambda, \varphi)\}$ の形態で値を得た場合、 $v_0(\lambda, \varphi)=1$ に着目して $E\{Q\}$ ， $E\{G\}$ を分離で

きる。

(5) システム方程式 一般にモーメントが存在する次数以下において、 $v_k(\lambda, \rho)$ とキュムラントは相互変換可能で、ことに4次以下では簡単な関係で結ばれる。従って、(2)～(4)節の議論に基づいて諸量を(9)式に代入すれば、高速版粉砕機動特性モデルは次式に帰着できる。

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, u_1, \theta_1) \quad (10)$$

ここに、 θ_1 は石炭性状や粉砕機経年変化に係わる未知パラメータ、 u_1 は給炭等の操作量、 x_1 は次の状態量である。なお<5.1>節において各ベクトルの要素を具体的に示す。

$$x_1 = (G \quad Gv_1(\lambda, \rho) \quad \dots \quad Gv_4(\lambda, \rho))^T \quad (11)$$

既報⁽³⁾に述べたとおり、パイロット粉砕機各操作端のステップ応答試験において、差圧式[†]および蓄積式[‡]の微粉炭流量実測値と、本モデルによる対応部位のオンライン計算値の比較等を行い、高速版粉砕機動特性モデル手法の総合的な検証を終えている。

<2.2> ボイラ動特性モデル 火炉制御サブシステムでは5節の手法で状態推定・未知パラメータ同定を行い、その際、次式のボイラ動特性モデルを用いる。

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x_2, u_2, \theta_2) = (g_g \quad \dots \quad g_w \quad \dots \quad g_p)^T \quad (12)$$

なお、 x_2 、 u_2 及び θ_2 は次の構成である。

$$\begin{aligned} x_2 &= (T_g \quad \dots \quad T_w \quad \dots \quad T_p)^T, \\ u_2 &= (G_f \quad \dots \quad G_{w_i} \quad \dots \quad G_p)^T, \\ \theta_2 &= \left(v \quad \frac{1}{\gamma} \right)^T \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、 v 及び γ はそれぞれ、求める燃料比と火炉汚れ係数である。

このとき、モデル式の右辺は次のとおり火炉、水壁、吊下過熱器のエネルギー・マスバランス式である。

$$\begin{aligned} g_g(x_2, u_2, \theta_2) &\equiv \frac{1}{V_g \rho_g} \left[Q_{g_i} (T_{g_i} - T_g) + Q_f \left(\frac{J_f}{C_g} - T_g \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{C_g} A_w \frac{\alpha_w}{\gamma} \left\{ (T_{g_i} (v, Q_f) + 273.15)^4 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (T_w + 273.15)^4 \right\} \right] \left(= \frac{dT_g}{dt} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} g_w(x_2, u_2, \theta_2) &\equiv \frac{1}{V_w \rho_w + \left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_w M_w C_{wm}} \left[Q_{w_i} (T_{w_i} - T_w) \right. \\ &\quad \left. + A_w \left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_w \frac{\alpha_w}{\gamma} \left\{ (T_{g_i} (v, Q_f) + 273.15)^4 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (T_w + 273.15)^4 \right\} \right] \left(= \frac{dT_w}{dt} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

[†] 差圧式：拡大管・縮小管の差圧と濃度・搬送空気流量との関係から微粉炭流量を求める

[‡] 蓄積式：微粉炭ホッパの重量変化速度から微粉炭流量を求める。

$$g_p(x_2, u_2, \theta_2) \equiv \frac{Q_p (T_{p_i} - T_p) + A_p \left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_p \alpha_p (T_w - T_p)}{V_p \rho_p + \left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_p M_p C_{pm}} \left(= \frac{dT_p}{dt} \right) \quad (16)$$

ここに、上式中の諸量として、熱伝達率 α 、密度 ρ 、伝熱面積 A 、比熱 C 、質量流量 G 、エンタルピ H 、発熱量 J 、質量 M 、摂氏温度 T 、内容積 V 、加えて、添字として、平均値 a 、燃料 f 、火炉 g 、入口 i 、メタル m 、吊下過熱器 p 、水壁 w の記号を定義した。

3. 音波式ガス温度計測

<3.1> 計測方式 火炉ガス温度の監視手段として、音波式ガス温度計測法は耐久性、輻射による誤差等の観点で優れた性質を有し、火炉制御サブシステムの主要構成要素である。本計測法の大型発電用ボイラ（炉幅30m程度）への適用に係わる技術開発事項の詳細は既報⁽⁵⁾であるので、以下、概要を紹介する。

本計測法は炉内送出信号発生、スピーカ、マイクロフォン及び受信信号処理部で構成され、次式に示す音速のガス温度依存性を利用している。

$$T = at^2 - 273.15 = \epsilon \left(\frac{d}{\tau} \right)^2 - 273.15 \quad (17)$$

ここに、記号として、ガス温度 $T[^\circ\text{C}]$ 、伝播経路長（スピーカーマイクロフォン間） $d[\text{m}]$ 、伝播時間 $\tau[\text{s}]$ 、音速 $u[\text{m/s}]$ 、ガス物性依存の定数 $\epsilon[^\circ\text{C}\text{s}^2/\text{m}^2]$ を用いた。

まず、炉内送出信号は既報⁽⁵⁾で述べるとおり、白色雑音類似の鋭い自己相関の波形が最適であり、本法ではM系列符号に着目し、図5示す正弦波のPRK（Phase Reversal Keying）変調を適用している。

図5 ガス温度計測における炉内送出波形
Fig.5 Testing Signal for Acoustic Gas Temperature Measurement

さらに、マイクロフォン受信信号の処理について、既報^(5,9)のとおり、既知信号検出に最適（フィルタ通過後のS/Nが最大）なFIRフィルタはマッチドフィルタであり、炉内の有色雑音混入に対処するため、図6の構成とする。すなわち、マッチドフィルタの基本型は雑音の白色性（周波数スペクト

ルが平坦)を前提とするため、音波式ガス温度計測への応用では炉内雑音の非白色性により誤差を生じる場合がある。そこで、図6の信号処理では、炉内雑音スペクトルの同定の後、雑音を白色化(スペクトルの平坦化)し、当該白色化による既知波形の変化を考慮してマッチドフィルタの基本型でS/N最大の信号検出を行っている。

図6 音波式ガス温度計測における信号処理フロー
Fig.6 Signal Processing Flow for the Acoustic Gas Temperature Measurement

＜3.2＞ 稼動実績 図7は1000MWe発電用ボイラにおいて、図5の炉内送出波形、図6の受信信号処理を適用し、音波送出時点よりマイクロフォン受信η、白色化後ν、マッチドフィルタ通過後ζの波形を例示している。これより、炉内雑音に埋もれた音波信号波形の抽出、伝播時間τの識別における良好な性能を確認できる。

図8に1000MWe発電用ボイラ緊急停止試験～再起動時において、火炉出口近傍5経路の音波式ガス温度測定例を示す。本例ではボイラ非定常状態の計測において上述した送出波形、信号処理法が効果を発揮し、緊急停止時の急速な変化からその後100%負荷到達まで、ガス温度の挙動を明瞭に把握できている。

図7 信号処理結果の例
Fig.7 Example of Processed Signal

さらに、火炉内に本計測とほぼ同位置に仮設したサクシ

ョンパイロメータ[†]による計測値との比較によれば、音波式ガス温度計測値は、図9に示すとおり負荷帯によらず、±70℃程度の差に収まっている。これは、火炉内火災のゆらぎ等を考慮すれば、実用上十分な精度と結論できる。

図8 負荷遮断・再起動時の火炉出口ガス温度計測例
Fig.8 F.E.G.T.[†] Measurement through Load Rejection and Start-up Operation

図9 火炉出口ガス温度音波式計測値の検証
Fig.9 Validation of Acoustic F.E.G.T.[†] Measurement

4. 同定・状態推定の枠組

＜4.1＞ 問題の定式化 石炭粉砕機、火炉制御の両サブシステムに適用する同定・状態推定の手法は、物理モデル手法の適用が容易なプラントモデルの連続時間記述と、未知パラメータの逐次変動を仮定している。両サブシステムにおける動特性モデルの記述は、(10)式、(12)式に示すとおり同形であり、本節の手法を共通に適用できるため、以下、両者を区別する添字 1 及び 2 を省略して議論を進める。

まず、プラントダイナミクスは状態量 $x \in \mathbf{R}^n$ 、未知パラメータ $\theta \in \mathbf{R}^l$ を確率変数とし、操作量 $u \in \mathbf{R}^m$ 、時刻 t を用いて次式に記述できる。

$$\begin{aligned} dx &= f(x, u, \theta)dt + d\beta \\ d\theta &= d\zeta \end{aligned} \tag{18}$$

[†]サクシオンパイロメータ：炉内輻射を遮るシース内にガスを吸引し、熱電対で温度測定する装置

[†]F.E.G.T; Furnace Exit Gas Temperature: 火炉出口ガス温度

[†]F.E.G.T; Furnace Exit Gas Temperature: 火炉出口ガス温度

ここに、 x, θ は、それぞれ、次式の性質のブラウン運動 $\beta \in \mathbf{R}^n$, $\zeta \in \mathbf{R}^l$ により擾乱されている。

$$\begin{aligned} (\beta(t) - \beta(\tau)) &\sim N(\mathbf{0}, Q_\beta |t - \tau|), \\ (\zeta(t) - \zeta(\tau)) &\sim N(\mathbf{0}, Q_\zeta |t - \tau|), \quad (\text{for } t \neq \tau) \end{aligned} \quad (19)$$

次に、観測プロセスは計算機処理に好適な離散時間記述とし、時刻 $t_k = t_0 + k\Delta t$ (Δt : 計算刻み幅)の添字を k とすれば、観測量 $y \in \mathbf{R}^p$ は次式に記述できる。

$$y_k = h(x_k, \theta_k) + w_k \quad (20)$$

ここに、観測雑音 $w \in \mathbf{R}^p$ は白色雑音であり、上述のブラウン運動を含めて、次の独立性を仮定する。

$$\begin{aligned} w_k &\sim N(\mathbf{0}, R_k), \\ E \left\{ \begin{pmatrix} w_k \\ \beta(t) - \beta(\tau) \\ \zeta(t) - \zeta(\tau) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_i^T & \beta^T(t) - \beta^T(\tau) & \zeta^T(t) - \zeta^T(\tau) \end{pmatrix} \right\} \\ &= \begin{pmatrix} R_k \delta_{k,i} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & Q_\beta |t - \tau| & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & Q_\zeta |t - \tau| \end{pmatrix} \quad (\text{for all } k, i, t \neq \tau) \end{aligned} \quad (21)$$

<4.2> システムダイナミクスの時間離散化 まず、本節の手法で刻み幅 Δt の繰返し計算を行い、時点 $t = t_k$ における状態量または未知パラメータ $\bullet_k$ について、時点 $t \leq t_i$ ($k \geq i$) におけるデータに基づく状態推定値または同定値 $\hat{\bullet}_{k/i}$ を得たと仮定し、これを用いてダイナミクス(18)式、及び、観測プロセス(20)式を以下のとおり線形化する。

$$\begin{aligned} d \begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_{k/k}^\# \\ \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} f(\hat{x}_{k/k}, u_k, \hat{\theta}_{k/k}) - A_{k/k} \hat{x}_{k/k} - B_{k/k} u_k - \Phi_{k/k} \hat{\theta}_{k/k} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} dt \\ &+ B_{k/k}^\# d \begin{pmatrix} \beta \\ \zeta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

$$y_k = H_{k/k-1} \begin{pmatrix} x_k \\ \theta_k \end{pmatrix} + h(\hat{x}_{k/k-1}, \hat{\theta}_{k/k-1}) - H_{k/k-1} \begin{pmatrix} \hat{x}_{k/k-1} \\ \hat{\theta}_{k/k-1} \end{pmatrix} + w_k \quad (23)$$

ここに、 $\hat{\bullet}_{k/n}$ まわりにおいて次の行列を定義した。

$$\begin{aligned} A_{k/k}^\# &\equiv \begin{pmatrix} A_{k/k} & \Phi_{k/k} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^{(n+l) \times (n+l)}, \\ B_{k/k}^\# &\equiv \begin{pmatrix} B_{k/k} \\ \mathbf{I} \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^{(n+l) \times m}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$H_{k/k-1} \equiv (C_{k/k-1} \quad \Psi_{k/k-1}) \in \mathbf{R}^{p \times (n+l)}$$

なお、上式においては次の偏微分係数を用いている。

$$A_{k/k} \equiv \left[\frac{\partial}{\partial x} f(\hat{x}_{k/k}, u_k, \hat{\theta}_{k/k}) \right]^T \in \mathbf{R}^{n \times n},$$

$$B_{k/k} \equiv \left[\frac{\partial}{\partial u} f(\hat{x}_{k/k}, u_k, \hat{\theta}_{k/k}) \right]^T \in \mathbf{R}^{n \times m},$$

$$\Phi_{k/k} \equiv \left[\frac{\partial}{\partial \theta} f(\hat{x}_{k/k}, u_k, \hat{\theta}_{k/k}) \right]^T \in \mathbf{R}^{n \times l},$$

$$C_{k/k-1} \equiv \left[\frac{\partial}{\partial x} h(\hat{x}_{k/k-1}, \hat{\theta}_{k/k-1}) \right]^T \in \mathbf{R}^{p \times n},$$

$$\Psi_{k/k-1} \equiv \left[\frac{\partial}{\partial \theta} h(\hat{x}_{k/k-1}, \hat{\theta}_{k/k-1}) \right]^T \in \mathbf{R}^{p \times l} \quad (25)$$

次に、時点 $t = t_k$ において、(22)式より時間刻み幅 Δt の将来を求める。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{pmatrix} &= F_{k/k} \begin{pmatrix} \hat{x}_{k/k} \\ \hat{\theta}_{k/k} \end{pmatrix} \\ &+ G_{k/k} \begin{pmatrix} f(\hat{x}_{k/k}, u_k, \hat{\theta}_{k/k}) \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} - A_{k/k}^\# \begin{pmatrix} \hat{x}_{k/k} \\ \hat{\theta}_{k/k} \end{pmatrix} + v_k \end{aligned} \quad (26)$$

ここに、 $F_{k/k}$, $G_{k/k}$ は、それぞれ、後述する状態遷移行列、駆動行列である。

このとき、状態遷移行列は Pade(1, 1) 近似により以下に求められる。なお、Pade(1, 1) 近似では Δt の2次 (=1+1) の項まで正確な級数展開と一致する。

$$\begin{aligned} F_{k/k} &\equiv \exp[\Delta t A_{k/k}^\#] = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(\Delta t A_{k/k}^\#)^j}{j!} \\ &= \mathbf{I} + \Delta t A_{k/k}^\# + \frac{1}{2} (\Delta t A_{k/k}^\#)^2 + \frac{1}{6} (\Delta t A_{k/k}^\#)^3 + \dots \\ &\equiv \mathbf{I} + \Delta t A_{k/k}^\# + \frac{1}{2} (\Delta t A_{k/k}^\#)^2 + \frac{1}{4} (\Delta t A_{k/k}^\#)^3 + \dots \\ &= \left(\mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} A_{k/k}^\# \right)^{-1} \left(\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} A_{k/k}^\# \right) \end{aligned} \quad (27)$$

ちなみに、Pade(1, 1) 近似は、連続系で安定な極 (左半平面内) を離散時間系で必ず安定な極 (単位円内) に射影する性質を有し、時間刻み毎の誤差伝播の観点で数値計算安定性向上に寄与している。この性質は、 $\lambda[f(A)] = f(\lambda[A])$ なる関係を利用し、 A の j 番目の固有値 $\lambda_j[A]$ に着目すれば、以下のとおり確認できる。

$$\begin{aligned} &\left| \lambda_j \left[\left(\mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} A_{k/k}^\# \right)^{-1} \left(\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} A_{k/k}^\# \right) \right] \right|^2 \\ &= \left| \frac{1 + \frac{\Delta t}{2} \lambda_j[A_{k/k}^\#]}{1 - \frac{\Delta t}{2} \lambda_j[A_{k/k}^\#]} \right|^2 = \frac{\left(1 + \frac{\Delta t}{2} \lambda_j[A_{k/k}^\#] \right) \left(1 + \frac{\Delta t}{2} \lambda_j^*[A_{k/k}^\#] \right)}{\left(1 - \frac{\Delta t}{2} \lambda_j[A_{k/k}^\#] \right) \left(1 - \frac{\Delta t}{2} \lambda_j^*[A_{k/k}^\#] \right)} \\ &= \frac{\left(1 + \Delta t \operatorname{Re} \left\{ \lambda_j[A_{k/k}^\#] \right\} + \frac{(\Delta t)^2 \left| \lambda_j[A_{k/k}^\#] \right|^2}{4} \right)}{\left(1 - \Delta t \operatorname{Re} \left\{ \lambda_j[A_{k/k}^\#] \right\} + \frac{(\Delta t)^2 \left| \lambda_j[A_{k/k}^\#] \right|^2}{4} \right)} < 1, \\ &\left(\because (\text{numerator}) > (\text{denominator}) > 0 \right. \\ &\left. \text{for } \operatorname{Re} \left\{ \lambda_j[A_{k/k}^\#] \right\} < 0, \Delta t > 0, j = 1, \dots, n+l \right) \end{aligned} \quad (28)$$

ここに、肩文字 * は複素共役を示す。

さらに、駆動行列は、(27)式の適用、及び、操作量の0次ホールド $u(t) = u_k$ ($t_k \leq t < t_{k+1}$) 仮定により、以下のとお

り導かれる。

$$G_{k/k} = (F_{k/k} - I)(A_{k/k}^\#)^{-1} B_{k/k}^\# \equiv \Delta t \left(I - \frac{\Delta t}{2} A_{k/k}^\# \right)^{-1} B_{k/k}^\# \quad (29)$$

このとき、(18)式のブラウン運動は次の白色雑音 v_k に離散化される⁽⁷⁾。

$$v_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \exp\{A_{k/k}^\#(t_{k+1}-t)\} B_{k/k}^\# d\left(\begin{matrix} \beta(t) \\ \zeta(t) \end{matrix}\right) \quad (30)$$

ここに、駆動行列に基づき v_k は次の統計量を持つ。

$$\text{Var}\{v_k\} = \hat{Q}_{k/k} = G_{k/k} \begin{pmatrix} Q_\beta & 0 \\ 0 & Q_\zeta \end{pmatrix} G_{k/k}^T \quad (31)$$

以上の諸式は拡張カルマンフィルタのフレームを満たし、未知パラメータ θ の常時変動の条件で次節に述べる同定・状態推定が行える。

5. システム構成と性能検証

<5.1> 石炭粉砕機制御サブシステム

(1) 構成と機能 石炭粉砕機制御サブシステムは図10の構成を用い、動特性モデルを主体に未知パラメータ同定・状態推定によりオンライン計測困難な諸量を把握し、これに基づく最適な制御を実現する。

まず、状態推定のステップとして実機操作量 u_1 (給炭量、分級機回転数、粉砕部加圧力、搬送空気量)の計測値および特性パラメータ θ_1 (漸次に変動する量；石炭粉碎性、粉砕部摩耗)の仮定値を粉砕機動特性モデルに与え、観測量 y_1 (オンライン計測可能な量；粉砕機差圧[†]、粉砕動力)の予測値および状態量 x_1 (オンライン計測困難な量；粉砕機出口微粉炭流量、保有炭量、両者の粒度分布)の算出値を求める。

図10 石炭粉砕機制御サブシステム
Fig. 10 Pulverizer Controlling Subsystem

このとき、特性パラメータ θ_1 の現在値は不明であるから最善の値を同定する必要がある、 y_1 の予測偏差(計測値

[†]粉砕機差圧：搬送空気入口と粉砕機構出口間の差圧 当該粉砕機構の粉体保有量と相関が知られている

とその予測値の差)を低減する方向に新たな仮定値 θ_1 を探索する。すなわち当該偏差最小(実プラントの挙動を最も的確に予測した場合)を与える θ_1 の仮定値、および、その際の動特性モデルによる x_1 の算出値を、それぞれ求める θ_1 の同定値、 x_1 の推定値(現時点で最も信頼できる値)とみなす。よって適当な時間間隔で以上の手順を繰り返えし、連続的に θ_1 の同定値および x_1 の推定値が得られる。

次に制御のステップとして状態推定ステップで求めたパラメータ θ_1 や状態量 x_1 と、その目標値(火炉制御サブシステムが算出する各段バーナ入口の微粉炭流量目標値、保有炭量、粒度分布の基準値)との偏差から次の時刻の操作量 u を求める。

すなわち石炭粉砕機制御サブシステムにおける状態推定および制御のステップを通じ、各バーナ入口微粉炭流量目標値への追従および保有炭量、粒度分布の適正化(粉砕機の良い運転状態維持)を実現できる。さらに実機特性に追従(状態推定によるパラメータ θ_1 、状態量 x_1 を反映)した粉砕機動特性モデルを用い、いわゆる予測制御によるプラント負荷変化中の石炭粉砕機台数増減時期の最適化(各粉砕機出口微粉炭流量将来値とオーバー／アンダーファイアリングによる所要微粉炭流量との偏差を解消)を行える。

(2) 稼働実績 本サブシステムは1000MWe発電用ボイラにおける全7台の国内最大級の石炭粉砕機の制御に適用され、図11には状態推定ステップの動作履歴の一例を粉砕機の負荷変化から停止操作を通じて示している。

図11 石炭粉砕機制御サブシステムの動作例

Fig. 11 Field Testing of the Pulverizer Controlling Subsystem

本例により粉砕機差圧、モータ動力の予測値と計測値の偏差に着目した石炭粉碎性(HG1)の推定、および粉碎性推定値に基づく粉砕機出口微粉炭流量、粒度分布の推定の状況が把握できる。このうち粉碎性および粉砕機出口粒度分布に

については実機よりサンプリングした石炭の分析値を追記してあり、本図より状態推定機能の精度を確認できる。

さらに図12は本サブシステムによる石炭粉碎性同定精度の検証にあたり、種々の炭種について手分析値との関係の一例を示す。本例において各炭種のHG I同定値は手分析値と±5程度の偏差で一致しており、図1に示した同一産地における当該値の±15程度のばらつき幅に比して、有効な情報が得られている。

図12 石炭粉碎性の同定精度の検証
Fig.12 Validation for the Grindability Identification

＜5.2＞ 火炉制御サブシステム

(1) 構成と機能 火炉制御サブシステムは図13に構成を示すとおり、ボイラ動特性モデル⁽⁴⁾、及び、音波式計測（4節に紹介）による火炉ノーズ下部ガス温度等の観測量に基づいて状態推定、制御を行う。

図13 火炉制御サブシステム
Fig.13 Furnace Controlling Subsystem

まず、状態推定のステップとしてボイラ動特性モデルを用い、実機と同一の操作量 u_2 （各段バーナ入口微粉炭流量、水壁内流体流量、吊下過熱器蒸気流量）から観測量 y_2 （火炉ガス温度、水壁出口流体温度、吊下過熱器出口蒸気温度）を予測し、並行して状態量 x_2 （火炉出口ガス温度等）を算出する。このときミル制御サブシステムと同様の手法で y_2 の計測値と予測値との一致状況に着目して特性パラメータ θ_2 （石炭燃料比、火炉伝熱面の汚れ）を同定する。

次に、制御のステップとして状態量 x_2 のうち火炉出口ガス温度は同ガス温度目標値（入熱配分調節機能が算出。図2参照）と比較され、その偏差が各バーナ段操作量算出機能に与えられる。本算出機能では火炉出口ガス温度偏差と特性パラメータ θ_2 から次の時刻の各段バーナ入口の微粉炭流量目標値（石炭粉碎機制御サブシステムに向け出力）を求める。

(2) 稼働実績 本節の状態推定・同定手法は既に国内最大級の石炭だき1000MWeボイラに適用され、燃料比と火炉汚れの変動を考慮した運転制御を実現している。図14は当該ボイラにおいて産地Dの石炭から産地Bの石炭に切り替わる際の動作例であり、石炭パンカの内容が約2時間で徐々に入替わる状況が把握できる。このボイラでは火炉内のガスの流れに沿って複数のバーナが設けられており、低燃料比（燃焼速度大）の産地Bの石炭に適応するため、火炉制御サブシステムは後流側（上段）のバーナの燃料量増加を推奨している。なお、燃料量推奨値の適用にあたり、いわゆる閉ループを回避して未知パラメータ同定を容易にするため、各バーナへの燃料配分割合を変化率制限器を介して階段状に変化させ、燃料量指令値とする。

図14 火炉制御サブシステムの動作例
Fig.14 Field Testing of the Pulverizer Controlling Subsystem

図15 石炭燃料比の同定精度の検証
Fig.15 Validation for the Fuel Ratio Identification

図15は本手法による燃料比の同定精度を確認するため、各産地の石炭について手分析値との関係を示す。火炉汚れとの同時同定により、当該影響を分離した評価が可能となり、図15に示すとおり、燃料比は±0.05程度の精度で同定されている。これは、図1に示した同一産地における当該値の±0.3程度のばらつき幅に比して、有効な情報が得られてい

ると考えられる。

＜5.3＞ 総合性能

(1) 従来法との比較 本節ではプラント特性変動対処の観点で、本報と従来法の制御系を比較し、併せて、シミュレーション解析による総合性能評価を紹介する。

まず、従来法の制御系は図2下段に示すとおり、ボイラプラント出力の観測値(蒸気温度、圧力等)から炭種コードに応じて操作量を算出する方式である。すなわち従来法は炭種コードで把握できないプラント特性変動への対処にあたり蒸気温度、圧力変動(ボイラ内諸プロセスの最終的な帰結)に着目する方式と位置づけられる。

一方、本研究の適応状態推定に基づく制御システムは図2上段に示す全体構成(ミル制御サブシステムをミル1台分で代表させた)となる。本法はプラント特性変動に対処するため、状態量(ミル出口微粉炭流量、火炉出口ガス温度等)およびプラント特性パラメータ(石炭粉碎性、燃料比、伝熱面汚れ等)の推定値から操作量を算出する方式である。すなわち本法は直接計測が困難であるが蒸気温度、圧力等に先行して変化する状態量と特性パラメータの推定値に着目する方式であり、従来法に比べ制御目標値への速応性およびプラント特性変動に対する安定性を期待できる。

本法の制御系の総合効果を確認するため、負荷変化(50→100%：5%/分、変圧運転)の条件でシミュレーション解析(5,6)を行った。解析条件は、産地Cの石炭(標準値；粉碎性：HGI=60、燃料比：FR=1.7)使用時において、HGI値-10、FR値+0.3程度の石炭性状変動を想定した。この解析結果は図16に示すとおり従来法では+8/-15℃程度の主蒸気温度変動が避けられないのに対し、本法では同+6/-6℃程度の良好な負荷変化特性を期待できる。すなわち本研究の適応状態推定に基づくボイラ制御システムは1.節の課題への対処に好適と結論できる。

図16 シミュレーション解析による予想効果
Fig 16 Simulated Total Performance

(2) 商用機への適用 本研究の適応状態推定に基づくボイラ制御システムは平成9年7月運用の発電用1000MWe 石炭だきボイラ商用機に製品として納入された⁽⁶⁾。本装置適用効果の確認にあたり、図17に同ボイラ試運転時の使用／除外試験結果の一例を示す。

本例では変圧運転負荷変化(50→75%：4%/分)の条件に

おいて、石炭性状の変動により従来法では主蒸気、再熱蒸気温度について、それぞれ、+5/-5℃、+5/-18℃程度の制御偏差(再熱蒸気温度低警報の発生)が避けられないのに対し、本研究の制御装置使用時には同様の運転条件で、それぞれ、+3/-5℃、+5/-10℃程度の偏差に改善されている。

さらに、前述したとおり、厳密に同一条件の比較が可能なシミュレーション解析による負荷変化特性改善効果の確認や、サンプル炭の手分析値と石炭粉碎機・火炉制御サブシステムの石炭性状変動推定値の比較を通じ、本研究の提案の実用性の総合的な検証を終えている。

図17 実機における効果の検証
Fig 17 Field Validation of Proposed Controlling for Main Steam[†] and Reheat Steam[†] Temperature

6. まとめ

我国の電力供給の主軸を担う石炭だき大容量変圧貫流ボイラの燃料性状多様化への対応と、負荷変化性能の向上に資するため、以下を特徴とする研究を行った。

- 1) 粉碎機制御サブシステムと火炉制御サブシステムにより構成され、石炭性状やボイラ伝熱特性の変動に対処して石炭火力の良好な運転性能を実現するボイラ制御装置の構成を提案した。
- 2) 石炭粉碎機制御サブシステムで中心的役割を演じる粉碎機動特性モデルについて、粉碎機内部の非線形な混合、粉碎、分級機構について、4次以下のモーメントによる石炭粒度分布変化のパラメタライズ法を考案して、非ガウス性の模擬とオンライン稼動のための計算負荷制限との両立を達成した。
- 3) 火炉制御サブシステムで特徴をなす音波式ガス温度計について、本研究では炉内送出波形として鋭い自己相関を有するM系列PRK(Phase Reversal Keying)波の選定と、炉内雑音AR(Auto Regression)同定に基づく白色化部前置マッチドフィルタによる信号検出機能の考案とにより、大型発電用ボイラ過渡状態の火炉ガス温度計測を可能に

[†]Main Steam, 主蒸気：高圧タービンへ供給の蒸気
[†]Reheat Steam, 再熱蒸気：高圧タービン排気の再加熱

した。

- 4) 石炭粉砕機，火炉の両制御サブシステムにおける同定・状態推定の枠組みは拡張カルマンフィルタに基づき，物理現象の記述が容易な連続時間の動特性モデル，及び，石炭性状等の未知パラメータの逐次変動を仮定し，Pade(1,1)近似によるプラントモデルの絶対安定な時間離散化法を用いた。
- 5) 石炭粉砕機，火炉両制御サブシステムの機能検証について，両サブシステムによる石炭粉砕性，石炭燃焼速度，伝熱面汚れ度の同定機能について，実機試験を通じて実用性の確認を終えた。

本研究成果の実プラントへの適用にあたり，懇切なご指導と，暖かいご支援を賜った電源開発株式会社火力部，同社松浦火力発電所2号機建設所の各位に，深甚な謝意を表させていただきます，本論文の結びとする。

(平成11年06月21日受付，平成12年01月07日再受付)

文 献

- (1) 深山：発電用石炭だきボイラの制御のための適応状態推定に関する研究；九州大学システム情報科学研究科博士論文(1999)
- (2) 深山，山本，川瀬，山中：石炭だきボイラ総括制御システムの開発；火力原子力発電，Vol.44，No.11，pp.1349-1355(1993)
- (3) 深山，金氏，井山，川瀬，湯浅，山本：粉体粒径のモーメントに着目した粉砕機のモデリング；システム制御情報学会論文誌，Vol.7，No.9，pp.361-371(1994)
- (4) 深山，石黒，川瀬：ボイラプラントシミュレータの開発と応用；火力原子力発電，Vol.37，No.11，pp.1189-1199(1986)
- (5) Fukayama, Y. et al.: Acoustic Gas Temperature Measurement for Controlling Boilers; Proc. of '96 Symposium on Flexible Automation, ASME, pp.433-440, Boston MA (1996)
- (6) 酒井，田辺，古川，深山：最新鋭大容量石炭だきボイラの完成；日立評論，Vol.80，No.2，pp.205-210(1998)
- (7) Jazwinski, A.: Stochastic Process and Filtering Theory; Academic Press, San Diego CA, 1970
- (8) Cramer, H.: Mathematical Methods of Statistics, Princeton

Univ. Press, Princeton NJ, 1946

- (9) Thomas, J.: An Introduction to Communication Theory and Systems, Springer-Verlag, New York NY, 1988

深山 幸穂

(正員) 1978年3月広島大学工学部電気工学科卒業。同年4月パブコック日立(株)入社。主として同社呉研究所に勤務し現在に至る。この間，1992年6月米国イリノイ大学大学院電気工学計算機科学科修士課程修了，1999年3月九州大学大学院システム情報科学研究科博士後期課程修了。(工学博士)。IEEE，日本機械学会，計測自動制御学会，システム制御情報学会の会員。

平澤 宏太郎

(正員) 1966年3月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。同社日立研究所勤務。1991年8月同社大みか工場勤務。1992年12月九州大学大学院システム情報科学研究科教授，現在に至る。(工学博士)。計測自動制御学会，情報処理学会，IEEEの会員。

村上 義雄

(非会員) 1978年3月広島大学理学部数学科卒業。1989年パブコック日立(株)入社。現在，同社呉事業所火力技術本部制御システム設計部情報システム設計課長。プラント運転支援計算機システムの開発，設計に従事。

津村 俊一

(非会員) 1980年3月横浜国立大学工学部化学工学科卒業。同年4月パブコック日立(株)入社。現在，同社呉事業所火力技術本部火力設計部主任技師。発電用ボイラ燃焼システムの開発，計画に従事。日本機械学会，火力原子力発電技術協会の会員