

計器誤差と熱バランスを考慮した高精度状態監視技術の提案 Condition Monitoring Method by Heat Balance Model and Instruments Tolerance Data for Power Plants

笠原 孝保[†] 金田 昌基[†] 大城戸 忍[‡]
Takayasu Kasahara Masaki Kanada Shinobu Okido

1. はじめに

発電プラントや化学プラントなどの大規模プラントに対して、計測データをもとに、プラントの系統・機器の健全性をモニタリングする状態監視技術が開発されている。多くの場合、既設の計器は、プラント全体の配管機器・系統の網羅的な診断を目的としていないため、既設の計測データだけを利用してプラント全体の機器・系統の性能と健全性を判定するには限界がある。一例として、発電プラントなどでは、各系統での配管からの微少リークなどは既存の計器データからは検出されず、多くの微小リークの確認は運転中の目視点検に頼ってきた。その対策として無数の配管、弁などのリークをカバーする計器を追加するのは大きなコストがかかる。

しかし、プラントの系統機器の誤差や熱バランスなどにかかわるプラントの状態量相互の関係に関するエンジニアリング知識を活用すれば、計器の追加をすることなく、状態監視の範囲と精度を向上させることができると期待できる。本研究は計器からの測定値とエンジニアリング知識を利用することにより、プラントの状態量の計測値との誤差、および熱バランスの誤差を最小化する最適化評価によって、非計測のプラント状態量を推定しプラント状態監視の範囲を拡大することが可能であることを示した。

2. 手法の概要

本研究で提案する高精度状態監視手法は、計装システムで直接の計測する計測値に加えて、プラントに関する事前知識を併用して、センサで直接計測していないプラントの状態量の推定や、系統・機器の状態量、および性能値をより正確に把握する手法である。図1に基本的な考え方を説明するための例図を示す。B1、B2の2つの機器からなる蒸気系統で、B1とB2の間に配管でつながっているとす。F1、F2、F3、F4は質量流量で、P1、P2、P3、P4は該当個所での圧力、T1、T2、T2、T4は該当個所での温度とする。このうち、F3とF4は非計測であるとする。また、機器B1およびB2からは、それぞれ非計測のリーク流量F6、F5があるとす。

このとき、非計測のF3、F4、F5、F6は、変数x_{F3}、x_{F4}、x_{F5}、x_{F6}で表す。すると、質量バランスは以下の式となり、この式だけからでは、変数が4つで式が2つしかなく、非計測の流量を推定できない。

$$F1 + xF4 = F2 + xF6 \quad \dots (2-1)$$

$$F2 = xF3 + xF4 + xF5 \quad \dots (2-2)$$

しかし、外部からB1への入力蒸気のエンタルピは、圧力と温度からh(P1,T1)のように求めることができる。同様

[†] 日立製作所 Hitachi Ltd.

[‡] 日立GEニュークリア・エナジー
Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

に、B1からB2への蒸気エンタルピはh(P2,T2)、B2から外部への出力蒸気のエンタルピはh(P3,T3)、B2からB1へと流れる蒸気のエンタルピはh(P4,T4)のように求めることができる。しかしながら、B2からのリークに対応するエンタルピh₅、B1からのリークのエンタルピh₆は計算できないので、これらを変数x_{h5}、x_{h6}とする。

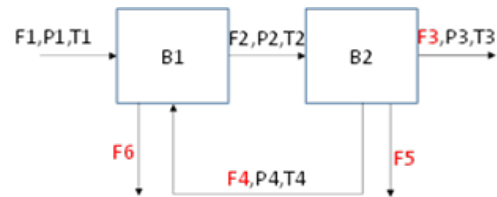


図1 熱および質量バランス例図

これらのエンタルピ値を用いて、単位時間あたりの熱量バランスから以下の式が得られる。

$$F1 \times h(P1, T1) + xF4 \times h(P4, T4) = F2 \times h(P2, T2) + xF6 \times xh6 \dots (2-3)$$

$$F2 \times h(P2, T2) = xF3 \times h(P3, T3) + xF4 \times h(P4, T4) + xF5 \times xh5 \dots (2-4)$$

しかし、これでも、変数が6つで、式が4つしかないので、流量x_{F3}、x_{F4}、x_{F5}、x_{F6}を求めることができない。

そこで、計測値から、もっともらしい真の値を推定することを考える。本研究で提案する手法はその手段の一つとして、質量バランスの式のずれとエネルギーバランスの式のずれ、および、計器の誤差の総和を最小にする最適化問題を解くこととす。もっともらしい値を推定する。ただし、これら各項を適切に規格化しなければ、特定の項だけが、最適化されてしまう。そこで、以下のような考え方で規格化をおこなうこととした。

- ・計器の誤差については多くの場合、誤差の工学値が標準偏差であたえられているのでこれを利用して規格化する。
- ・質量バランス、およびエネルギーバランスについては、質量、およびエネルギーの絶対値で規格化する。

図1の例では以下の目的関数を最小化する制約条件なしの非線形最適化問題となる。

$$EV = \left(\frac{F1 - xF1}{\sigma_1} \right)^2 + \left(\frac{F2 - xF2}{\sigma_2} \right)^2 + \left(\frac{xF1 + xF4 - (xF2 + xF6)}{xF1 + xF4} \right)^2 + \left(\frac{xF2 - (xF3 + xF4 + xF5)}{xF2} \right)^2 + \left(\frac{xF1 \times h(P1, T1) + xF4 \times h(P4, T4) - (xF2 \times h(P2, T2) + xF6 \times xh6)}{xF1 \times h(P1, T1) + xF4 \times h(P4, T4)} \right)^2 + \left(\frac{xF2 \times h(P2, T2) - (xF3 \times h(P3, T3) + xF4 \times h(P4, T4) + xF5 \times xh5)}{xF2 \times h(P2, T2)} \right)^2 \dots (2-5)$$

ここで、 σ_1 および σ_2 は、それぞれF1、F2を測定する計器の標準偏差である。

ただし、上式では、計器のある F1、F2 の流量も計測値と真値は異なると考えられるため、真値として、 x_{F1} 、 x_{F2} などを導入している。この例では、式が変数に対して不足している場合を示したが、計器が多数あり、状態量に関する事前知識が多くある場合には式が変数に対して過剰な場合もありえる。その場合にも、同様の目的関数により、冗長な計測データと事前知識から、プラント全体の計測値をもとに、もっとも真値に近いと考えられるプロセス量の値を推定することが期待できる。

以下、一般的な定式化を示す。本手法では、プラントの性能解析に用いるパラメータを以下の4種類に分類して解析する。なお、説明を簡単にするため以下では各パラメータの時間変化は考慮しない。

2.1 プラント状態監視のためのパラメータ

- 計測データ $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{\text{num}(M)}\}$: プラントセンサからの計測データ。 $\text{num}(M)$ は計測データの数である。以後の解析では、この計測データを各時点での定数として用いる。
- 計測プロセス変数 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{\text{num}(P)}\}$: プラントの状態量を表す変数。 $\text{num}(P)$ は計測プロセス変数の数である。計測プロセスパラメータは、後述のどれかのセンサーモデルの出力となるものとする。計測データが計器からの定数データとして扱われるのに対して、計測プロセス変数は、式(2-5)中の x_{F1} 、 x_{F2} などのような、その時点での“正しい”系統・機器の性能値や圧力・温度、流量などの状態量を意味し、後述する最適化によって最適値が算出される。もし、計測データと計測プロセス変数が一対一に対応しているのであれば、その2つの値の差は、計測誤差を意味する。
- 非計測プロセス変数 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_{\text{num}(N)}\}$: 計器によって直接的には測定されないプラントの系統・機器の性能値や圧力・温度、流量などの状態量を表す変数。 $\text{num}(N)$ は非計測プロセス変数の数である。火力や原子力プラントなどの主蒸気エンタルピは、蒸気圧力と温度から蒸気表を用いて算出できるので、計測パラメータともとれるが、直接の計測データを用いるのではなく、他のプロセス量、つまり直接計測パラメータとしての蒸気圧力と温度を用いて算出されるため、非計測プロセス変数とする。
- 性能パラメータ $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{\text{num}(E)}\}$: 系統機器の性能を表すパラメータ。 $\text{num}(E)$ は性能パラメータの数である後述の性能評価モデルから算出される。

計測プロセス変数が、後述するセンサーモデルの出力となっているのに対し、非計測プロセス変数と性能パラメータは、センサーモデルの出力となっていない。つまり、ここでは、直接計器によって計測されているプラントの状態量を計測プロセス変数と呼び、そうでないもののうち、性能の評価指標となるものを特に性能パラメータと呼び、それ以外の直接計測されないプラント状態量を非計測プロセス変数と呼んでいる。

2.2 プラントの評価のための評価モデル関数

以上のパラメータを入出力とする次の関数でプラントを模擬する。

- センサーモデル

$$fM_i(i, m_1, m_2, \dots, m_{fM(i)}) = p_i, i = 1, \dots, \text{num}(fM) \quad \dots(2-6)$$

ここで、 i はセンサーモデルの識別番号であり、 $\text{num}(fM)$ はセンサーモデルの総数である。センサーモデルは、計測パラメータを入力とし、ひとつの計測プロセス変数値を出力する関数である。すべてのプロセスパラメータが、どれかのセンサーモデル関数の出力となっているとする。もっとも簡単な、そして多くの場合は、1つのセンサ値に1つのプロセス量が対応している場合である。この場合は、センサ値の真値がプロセス値と解釈する。つまり、センサ値と、プロセス値の差はセンサの誤差と解釈できる。

- 非計測プロセス変数評価モデル

$$fN_i(i, p_1, p_2, \dots, p_{N(i)}) = n_i, i = 1, \dots, \text{num}(fN) \quad \dots(2-7)$$

ここで、 i は非計測プロセス変数評価モデルの識別番号であり、 $\text{num}(fN)$ は非計測プロセス変数評価モデルの総数である。非計測プロセス変数評価モデルは、計測プロセス変数、および出力となる以外の非計測プロセス変数を入力とし、1つの非計測プロセス変数値を出力する関数である。例えば、タービンの蒸気圧力と温度をプロセス値とすると、蒸気表関数[1]を用いてエンタルピを計算できる。蒸気表関数が蒸気エンタルピに対応する非計測パラメータ評価モデルということになる。

一般には、すべての非計測パラメータに対して具体的な計測パラメータ評価モデルを用意することは困難である。もし、非計測プロセス変数評価モデルが用意できない非計測プロセス変数があっても、後述するエネルギーバランスや質量バランスにより値を推定することはできる。

- 性能パラメータ評価モデル

$$fE_i(i, p_1, \dots, p_{fE(p,i)}, \dots, n_1, \dots, n_{fE(n,i)}, \dots) = e_i, i = 1, \dots, \text{num}(e) \quad \dots(2-8)$$

ここで、 i は性能パラメータ評価モデルの識別番号であり、 $\text{num}(e)$ は、性能評価パラメータの総数である。また、 $fE(p,i)$ 、 $fE(n,i)$ は、性能パラメータ評価モデル i に対する計測プロセス変数の引数、および非計測プロセス変数の引数の数である。性能パラメータ評価モデルは、計測プロセス変数と非計測プロセス変数を入力とし、性能評価パラメータを出力とする関数である。本研究の解析手法は、すべての性能パラメータに対して、その性能評価パラメータを出力とする性能評価モデルが用意されていることを前提とする。発電プラントにおけるボイラ熱出力やプラント効率、および各種ポンプの効率などが性能評価パラメータにあたる。

2.3 状態量評価のための最適化

本研究では、限られた計測値をもとに、非計測のパラメータを含むプラント状態量を推定するために、以下の真の値との誤差の各項の2乗和を目的関数とする。

- 最適計算によって得られた各変数値をもとにセンサーモデルによって計算された計測プロセス変数値と最適化計算によって得られた計測プロセス変数値との差。

もっとも単純には、計器の値と真のプロセス値 p_i との差となる。

$$\Delta p_i = fM_i(i m_1, i m_2, \dots, i m_{fM(i)}) - p_i \quad \dots (2-9)$$

- (2) 非計測プロセス変数評価モデルにより計算された非計測プロセス変数値と最適化計算によって評価された非計測プロセス変数値との差

$$\Delta n_i = fN_i(i p_1, i p_2, \dots, i p_{fN(i)}) - n_i \quad \dots (2-10)$$

- (3) 系統・機器の物理構成にもとづく質量、およびエネルギーバランス誤差

図2のような機器構成を考える。機器への入力流量が $F1[\text{kg/h}]$ でそのエンタルピが $h1[\text{kJ/kg}]$ 、出力流量が $F2[\text{kg/h}]$ そのエンタルピが $h2$ 、機器の動力による熱生成が $Q[\text{kJ/h}]$ とする。この時、質量バランスおよび熱バランスの誤差は以下ようになる。各系統・機器に対して同様の誤差を定義する。

- (i) 質量バランス誤差

$$\Delta F = F1 - F2 \quad \dots (2-11)$$

- (ii) エネルギーバランス誤差

$$\Delta E = F1 \times h1 + Q - F2 \times h2 \quad \dots (2-12)$$

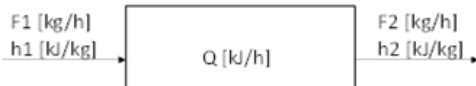


図2 着目部位の熱および質量バランス

本研究では、微分を用いない非線形最適化パッケージ DFO-LS[2]を利用することを前提とし、(2-8)~(2-12)式の4種類の誤差の2乗和の総和を目的関数として用いることとした。ただし、各誤差項の絶対値の大きさは、桁が違うものも含まれるため、このままだと絶対値の大きな誤差項ほど、自動的に重要視され最適化され不適切である。適切な誤差項の規格化が必要である。直接計測プロセス変数の誤差 Δp_i については、計器誤差の設計値が標準偏差の値などで提示されているので、これを利用するのが適切であると考えられる。文献[3]によれば、原子力プラントにおける圧力計の誤差は1%程度、流量計の誤差は2%程度となるので、簡単のため本報ではこれを利用することとする。一方、 Δn_i 、 ΔF および ΔE については、適切な指標がないので、誤差は一律に比較するパラメータの絶対値で規格化することとした。

たとえば、 Δn_i では、計測値から直接算出された以下の非計測パラメータ値 \hat{n}_i の絶対値で規格化することとした。

$$\hat{n}_i = fN_i(i m_1, i m_2, \dots, i m_{fN(i)}) \quad \dots (2-13)$$

質量バランスについては、比較対象の2つの流量の平均値とする。図1の例では、 $(F1+F2)/2$ の値で規格化する。エネルギーバランスについては、 $(F1 \times h1 + Q + F2 \times h2) / 2$ の値で規格化することとなる。

以上まとめると、最小化する誤差の項は、以下となる。第一項は、直接計測プロセス変数の誤差で σ_i は対応するセンサの標準偏差、第3項は質量バランス項、第4項は、エネルギーバランス項である。

$$E = \sum \left(\frac{\Delta p_i}{\sigma_i} \right)^2 + \sum \left(\frac{\Delta n_i}{\hat{n}_i} \right)^2 + \sum \left(\frac{\Delta F_i}{(F1+F2)/2} \right)^2 + \sum \left(\frac{\Delta E_i}{(F1 \times h1 + Q + F2 \times h2)/2} \right)^2 \quad \dots (2-14)$$

3. 仮想プラントによる手法の評価

3.1 仮想プラントの概要

開発手法の有効性、限界を確認するため図3に示す簡単な仮想プラントを用いて、以下の項目に着目した計算実験を行った。

- ・センサの異常と機器の異常との識別が可能であるか？
- ・誤差の規格化の設定の影響はどの程度か？
- ・本手法の評価方法では、リークなどにより質量バランスの不整合な個所があった場合、プラント全体にわたってエネルギー、質量のバランスのずれの影響が全体にまんべんなく伝搬し、リーク個所の同定ができないのではないか？

仮想プラントはタービンとボイラからなる発電プラントを想定したごく簡易的なもので、発電システムの教育用に作成された文献[4]を参考にした。

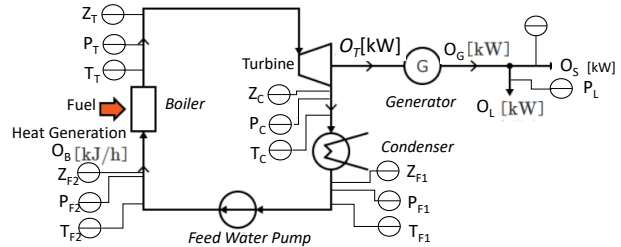


図3 評価用仮想プラント

3.2 仮想プラントの定式化

以下に本手法による仮想プラントのモデル式を示す。

- (1) 計測データ

図中に示した計器記号に対応する計測データ

- Z_T : 蒸気流量[t/h]
- P_T : 蒸気圧力[Pa]
- T_T : 蒸気温度[K]
- Z_C : 復水器入口流量[t/h]
- P_C : 復水器入口圧力[Pa]
- T_C : 復水器入口温度[K]
- Z_{F1} : 復水器出口流量[t/h]
- P_{F1} : 復水器出口圧力[Pa]
- T_{F1} : 復水器出口温度[K]
- Z_{F2} : 給水流量[t/h]
- P_{F2} : 給水圧力[Pa]
- T_{F2} : 給水温度[K]
- O_S : 送電端出力[kW]
- O_L : 所内電力[kW]
- O_T : タービン機械出力[kW]

- (2) 計測プロセス変数

上記、計測データに対応するプロセス値。

- xZ_T : 蒸気流量[t/h]
- xP_T : 蒸気圧力[Pa]
- xT_T : 蒸気温度[K]
- xZ_C : 復水器入口流量[t/h]
- xP_C : 復水器入口圧力[Pa]
- xT_C : 復水器入口温度[K]
- xZ_{F1} : 復水器出口流量[t/h]
- xP_{F1} : 復水器出口圧力[Pa]
- xT_{F1} : 復水器出口温度[K]

xZ_{F2} : 給水流量[t/h]

xP_{F2} : 給水圧力[Pa]

xT_{F2} : 給水温度[K]

xO_S : 送電端出力[kW]

xO_L : 所内電力[kW]

xO_T : タービン機械出力[kW]

(3) 非計測プロセス変数とモデル式

上記、各温度、圧力に対応するエンタルピ。ST は、蒸気表関数である。

xI_T : 蒸気エンタルピ[kJ/kg] = ST (xP_T , xT_T)

xI_C : 復水器入口エンタルピ[kJ/kg]
= ST (xP_C , xT_C)

xI_{F1} : 復水器出口エンタルピ[kJ/kg]
= ST (xP_{F1} , xT_{F1})

xI_{F2} : 給水エンタルピ[kJ/kg] = ST (xP_{F2} , xT_{F2})

xO_B : ボイラ熱出力(燃料発熱量)[kJ/h]

(4) 性能パラメータとモデル式

ここでは、簡単のため発電機の効率は100%と仮定し、タービン効率のみ考慮する。

ξ : タービン発電効率

$$\xi = \frac{xO_T \times 3600}{xZ_T \times xI_T - xZ_C \times xI_C} \quad \dots (3-1)$$

(5) 誤差項の設定:

(a) 直接計測プロセス変数とセンサーモデルと計測データから計算されたプロセス値との差

式(2-14)の各項の誤差の規格化については、以下のように、文献[3]に基づき、流量、温度については計測値の2%で規格化し、圧力については計測値の1%で規格化した。

$$\Delta Z_i = (Z_i - xZ_i) / (Z_i \times 0.02), \quad i=T, C, F1, F2 \quad \dots (3-2)$$

$$\Delta P_i = (P_i - xP_i) / (P_i \times 0.01), \quad i=T, C, F1, F2 \quad \dots (3-3)$$

$$\Delta T_i = (T_i - xT_i) / (T_i \times 0.02), \quad i=T, C, F1, F2 \quad \dots (3-4)$$

(b) 非計測プロセス変数評価モデルと真のプロセス値との差

$$\Delta I_T = (xI_T - ST(xP_T, xT_T)) / ST(xP_T, xT_T) \quad \dots (3-5)$$

$$\Delta I_C = (xI_C - ST(xP_C, xT_C)) / ST(xP_C, xT_C) \quad \dots (3-6)$$

$$\Delta I_{F1} = (xI_{F1} - ST(xP_{F1}, xT_{F1})) / ST(xP_{F1}, xT_{F1}) \quad \dots (3-7)$$

$$\Delta I_{F2} = (xI_{F2} - ST(xP_{F2}, xT_{F2})) / ST(xP_{F2}, xT_{F2}) \quad \dots (3-8)$$

(c) 質量およびエネルギーバランス誤差項

・ボイラ周辺

$$\Delta M_B = (xZ_T - xZ_{F2}) / \left(\frac{xZ_T + xZ_{F2}}{2} \right) \quad \dots (3-9)$$

$$\Delta E_B = (xZ_T \times xI_T - xZ_{F2} \times xI_{F2} - xO_B \times 1000) / \left(\frac{xZ_T \times xI_T + xZ_{F2} \times xI_{F2} + xO_B \times 1000}{2} \right) \quad \dots (3-10)$$

・タービン周辺

$$\Delta M_T = (xZ_T - xZ_C) / \left(\frac{xZ_T + xZ_C}{2} \right) \quad \dots (3-11)$$

$$\Delta E_T = (xZ_T \times xI_T - xZ_C \times xI_C - xO_T / \xi)$$

$$/ \left(\frac{xZ_T \times xI_T + xZ_C \times xI_C + xO_T / \xi}{2} \right) \quad \dots (3-12)$$

・復水器周辺

$$\Delta M_C = (xZ_{F1} - xZ_C) / \left(\frac{xZ_{F1} + xZ_C}{2} \right) \quad \dots (3-13)$$

$$\Delta E_C = (xZ_{F1} \times xI_{F1} - xZ_C \times xI_C) / \left(\frac{xZ_{F1} \times xI_{F1} + xZ_C \times xI_C}{2} \right) \quad \dots (3-14)$$

・給水ポンプ周辺

$$\Delta M_F = (xZ_{F1} - xZ_{F2}) / \left(\frac{xZ_{F1} + xZ_{F2}}{2} \right) \quad \dots (3-15)$$

$$\Delta E_F = (xZ_{F1} \times xI_{F1} - xZ_{F2} \times xI_{F2}) / \left(\frac{xZ_{F1} \times xI_{F1} + xZ_{F2} \times xI_{F2}}{2} \right) \quad \dots (3-16)$$

4. 検討評価結果

本手法の有効性について確認するため、比較のベースとなる定常状態での評価を行い、設定した計測値が定常状態において適切なものであることを確認した。次に、(2-14)式の各誤差項の規格化定数の影響がどの程度であるかを確認した。そのうえで、計測値が故障した場合とリークが発生した場合を模擬した以下のケースデータを作成し、比較・検討した。

4.1 ベースケース

ベースケースでは、各測定値が、プラント全体の質量バランス、熱バランス、蒸気表関数によるエンタルピ値が整合するように設定した上で解析を実施した。表1にベースケースにおける計測値(設定値をそのまま用いた)と、変数の最適値を、表2には、非計測プロセス変数であるエンタルピ値、性能値であるボイラ熱出力(xO_B)、タービン効率 ξ の設定値と(2-14)の誤差項を最小化したときの各変数の最適評価値を示す。

計測値と評価値の誤差は、すべての計測プロセス変数と非計測プロセス変数に対して0.03%以下あり、仮想プラントのベースケースにおける計測値の設定値が質量バランスの式と整合した妥当なものであるとみることができる。

表1 ベースケース-計測プロセス変数

	Z_i [t/h]	P_i [MPa]	T_i [K]	Z_c [t/h]	P_c [MPa]	T_c [K]
計測値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
評価値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
誤差[%]	-2.79E-02	5.51E-07	-5.45E-07	2.27E-03	0.00E+00	1.71E-07

表2 ベースケース-非計測プロセス変数

	O_S [kW]	O_I [kW]	xO_B [kJ/h]	ξ [%]
設定値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
評価値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
誤差[%]	3.61E-07	2.84E-08	0.00E+00	-1.27E-04

表2 (続き)

	I_T [kJ/kg]	I_C [kJ/kg]	I_{F2} [kJ/kg]	I_{F1} [kJ/kg]
設定値	2.90E+03	5.77E+02	5.77E+02	5.77E+02
評価値	2.90E+03	5.77E+02	5.77E+02	5.77E+02
誤差[%]	2.48E-02	-7.73E-02	-7.73E-02	-7.73E-02

4.2 誤差項の規格化の影響

最適化において、規格化定数はある程度自由に設定できる値であり設定によっては解析結果に大きな影響が与えられる可能性がある。そこで、以下のように、(2-14)式の3種類の規格化定数であるエネルギーバランス(1-A)、(1-B)、質量バランス(1-C)、および計器の誤差(1-D)に関する規格化定

数を変えたケースを作成し、ベースケースと同じ設定で評価値の変化を確認した。

- (1-A) ボイラ熱出力を測定値とみなし、その絶対値に対して 1%の誤差設定。
- (1-B) ボイラ熱出力を測定値とみなし、その絶対値に対して 10%の誤差設定。
- (1-C) 流量計の誤差設定を 10%に設定。
- (1-D) Z_T (主蒸気流量)、 P_C (復水器出口圧力)、 T_{F2} (給水温度)の計器の誤差を 10%に設定。

表 3 に主要な解析結果を示す。各ケースの 3 行目の 誤差 [%] と示した行が、ベースケースとの差の絶対値を%で示したもので、いずれの結果も、ベースケースとの差は 0.04%以下で無視できる範囲と考えられる。このことから、今回の規格化定数の定め方によれば、規格化定数が数倍程度異なっても数値的に大きな結果の違いはなく、ロバストな結果が得られることが推定される。

表 3 規格化定数の影響

		Z_T [t/h]	P_C [MPa]	T_F [K]	Z_C [t/h]	P_C [MPa]	T_C [MPa]
1-A	計測値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	9.54E-03	4.34E-04	3.44E-03	1.35E-03	9.77E-07	7.00E-04
1-B	計測値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	9.54E-03	4.34E-04	3.44E-03	1.35E-03	1.02E-06	7.00E-04
1-C	計測値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	1.19E-02	1.71E-07	2.46E-06	3.01E-04	8.93E-10	6.27E-07
1-D	計測値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	1.19E-02	5.2E-07	3.3E-07	0.00013	7.5E-11	1.7E-07

表 3 (続き)

		Z_{F1} [t/h]	P_{F1} [MPa]	T_{F1} [K]	Z_{F2} [t/h]	P_{F2} [MPa]	T_{F2} [K]
1-A	計測値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	2.78E-04	1.03E-06	9.11E-04	2.39E-04	1.09E-06	1.15E-03
1-B	計測値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	2.78E-04	1.02E-06	9.12E-04	2.39E-04	1.12E-06	1.15E-03
1-C	計測値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	1.10E-03	8.92E-10	7.01E-07	8.14E-04	8.92E-10	6.77E-07
1-D	計測値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	0.00163	7.6E-11	0.00084	0.00064	1.3E-11	9.7E-08

4.3 故障ケースの評価

4.3.1 計器の故障

本手法において、計器の故障がどのように評価されるかを確認するため、以下のケースについて評価を行った。これらの故障の模擬は、ベースデータに対して、特定の計器のみを設定された誤差よりも大きく変動させることによって実施した。

- (2-A) タービン入口流量(Z_T)がベースケースより 2%多い。
- (2-B) タービン入口圧力(P_T)が正しい値より、0.1MPa 低い。
- (2-C) タービン入口温度(T_T)が正しい値より 3°C高い。
- (2-D) タービン入口温度(T_T)が正しい値より 31°C高い。
- (2-E) P_{F1} と P_{F2} が同じ状態量を測定しており、計測値として 2つの平均値を用いる場合で P_{F1} だけが正しい圧力より 0.2MPa 低い値を示している場合。

これらの結果を、表 4 に示す。また、その時の非計測パラメータの評価値を表 5 に示す。なお、非計測パラメータ

T_T, I_C, I_{F1}, I_{F2} については、計測値として、前章で記載したモデル式(蒸気表関数からなる)に、最適値として計算された温度と圧力値を入力して計算した値を用いた。また、 O_s, O_L, X_{OB} およびタービン発電効率 ξ についてはベースケースでの値を定常値として、その比較を記載した。以降の評価も同様とした。

表 4 を見ると、(2-A)のケースでは、 Z_T の変動分 2%の約半分にあたる 1%分の誤差が計器の誤差として評価されている。残りは、他の計器の誤差として分配されていると考えられる。ベースケースに対して全般に誤差評価値は増加しているが値そのものはごく小さいままである。(2-B)のケースでは、 P_T の誤差は、ベースケースに比べると 2倍以上になっているが誤差は 0.001%と小さい。(2-D)のケースも同様に、 T_T の誤差はベースケースと比較すると 1000 倍以上になっており、他の計器の誤差の増加に対して際立っているが、誤差の絶対値では 0.03%と小さい。(2-D)のケースは(2-C)の場合と比較して、温度の誤差を 10 倍にして評価したもので、誤差の絶対値では、0.3%と、10 倍になるが、値としては依然として小さい。これは、最適化による誤差最小化によって、 T_T の評価値が、計測値に近づく一方で、一部の誤差は、他の評価値へ誤差として分配されているためと考えられる。ベースケースに対する誤差の上昇の割合は他の計器に比べて大きいことから、本手法を用いて得られた正常時の誤差をモニタして蓄積するなどの工夫をすれば、正常時の機器の誤差との違いをより精度よく評価でき、計器の異常の同定ができる可能性がある。

一方、複数のセンサで同一のプロセス量を測定し、その平均値を測定値として用いる場合にはより高精度の故障判定が可能であると考えられる。表 4 の(2-E)のデータ行に示すように P_{F1} と、 P_{F2} は同じプロセス量を測定しているが、故障により P_{F1} は 2.8MPa を示しており、 P_{F2} は 3.0MPa(真値)を示していると設定している。このとき、 P_{F1} 、 P_{F2} の共通の測定量の評価値は、最適化計算によって、単純平均よりも、正常な計器である P_{F2} の測定量により近い値である 2.92MPa と評価され、その結果 P_{F1} には、4.2%という設計誤差(1%)の 4 倍以上の誤差評価値となる。このように、冗長なセンサがあれば、本手法においてもセンサ異常の同定が容易になる。

表 4 計器故障のケース-計測プロセス変数

		Z_T [t/h]	P_T [MPa]	T_T [K]	Z_C [t/h]	P_C [MPa]	T_C [MPa]
2-B	計測値	4.74E+03	6.80E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	6.80E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	4.41E-02	-1.01E-03	8.13E-03	-2.22E-03	-3.67E-07	-1.67E-03
2-C	計測値	4.74E+03	6.90E+00	5.90E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.73E+03	6.90E+00	5.90E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	1.55E-01	-3.52E-03	2.84E-02	-7.77E-03	-8.10E-06	-5.88E-03
2-D	計測値	4.74E+03	6.90E+00	6.18E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.66E+03	6.90E+00	6.16E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	1.68E+00	-2.72E-02	2.62E-01	-8.05E-02	-6.92E-05	-6.09E-02
2-E	計測値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	6.90E+00	5.87E+02	4.74E+03	2.95E+00	4.10E+02
	誤差[%]	-1.76E-02	4.17E-04	-3.30E-03	1.42E-03	1.82E+00	1.08E-03

表4 (続き)

		Z _{F1} [t/h]	P _{F1} [MPa]	T _{F1} [K]	Z _{F2} [t/h]	P _{F2} [MPa]	T _{F2} [K]
2-B	計測値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	-2.89E-03	-7.00E-07	-2.18E-03	-3.66E-03	-2.20E-06	-2.76E-03
2-C	計測値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	-1.01E-02	-9.57E-06	-7.67E-03	-1.28E-02	-9.63E-06	-9.72E-03
2-D	計測値	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.75E+03	3.00E+00	4.10E+02	4.75E+03	3.00E+00	4.10E+02
	誤差[%]	-1.05E-01	-7.69E-05	-7.93E-02	-1.33E-01	-1.15E-04	-1.01E-01
2-E	計測値	4.74E+03	2.80E+00	4.10E+02	4.74E+03	3.00E+00	4.10E+02
	評価値	4.74E+03	2.92E+00	4.10E+02	4.74E+03	2.92E+00	4.10E+02
	誤差[%]	6.40E-05	-4.11E+00	4.97E-05	2.01E-03	2.74E+00	1.53E-03

表5 計器故障のケース-非計測プロセス変数

		O ₂ [kW]	O ₁ [kW]	xO ₂ [kJ/h]	ξ[%]
2-B	定常値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	評価値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	誤差[%]	1.72E-06	3.43E-06	-3.19E-05	-4.59E-02
2-C	定常値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	評価値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	誤差[%]	-7.41E-05	2.13E-07	-1.03E-04	9.64E-02
2-D	定常値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	評価値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.27E-01
	誤差[%]	6.62E-04	-1.27E-04	-1.34E-03	1.93E+00
2-E	定常値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	評価値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	誤差[%]	3.06E-07	2.56E-07	5.72E-06	-1.23E-01

表5 (続き)

		I ₁ [kJ/kg]	I _C [kJ/kg]	I _{F2} [kJ/kg]	I _{F1} [kJ/kg]
2-B	計測値	2.90E+03	5.77E+02	5.77E+02	5.77E+02
	評価値	2.90E+03	5.78E+02	5.78E+02	5.78E+02
	誤差[%]	-1.06E-01	-8.26E-02	-8.59E-02	-8.41E-02
2-C	計測値	2.90E+03	5.77E+02	5.77E+02	5.77E+02
	評価値	2.91E+03	5.78E+02	5.78E+02	5.78E+02
	誤差[%]	-3.32E-01	-9.53E-02	-1.07E-01	-1.01E-01
2-D	計測値	2.90E+03	5.77E+02	5.77E+02	5.77E+02
	評価値	3.00E+03	5.79E+02	5.79E+02	5.79E+02
	誤差[%]	-3.29E+00	-2.62E-01	-3.81E-01	-3.18E-01
2-E	計測値	2.90E+03	5.77E+02	5.77E+02	5.77E+02
	評価値	2.90E+03	5.77E+02	5.77E+02	5.77E+02
	誤差[%]	2.23E-02	-6.81E-02	-6.65E-02	-6.53E-02

4.3.2 特定箇所でのリーク

復水器入口流量と復水出口流量との間の以下のリークを模擬。

(3-A)流量の1%のリーク。

(3-B)流量の2%のリーク。

リークは、該当する Z_Cと Z_{F1}間の流量の不整合、具体的には、下流側の Z_{F1}の流量計測値を上流側の Z_Cの流量値よりも1%または2%少なくすることによって模擬した。実際には、リークにともない、圧力、温度も変動するが、今回の模擬ではこの効果は無視した。主要な計器の評価誤差を表6に、非計測パラメータの評価誤差を表7に、リーク量の評価結果を表8に示す。

表6 リークケース-計測プロセス変数(流量のみ)

		Z ₁ [t/h]	Z _C [t/h]	Z _{F1} [t/h]	Z _{F2} [t/h]
3-A	計測値	4.74E+03	4.74E+03	4.69E+03	4.69E+03
	評価値	4.74E+03	4.73E+03	4.70E+03	4.70E+03
	誤差[%]	4.91E-02	1.62E-01	-9.06E-02	-8.00E-02
3-B	計測値	4.74E+03	4.74E+03	4.65E+03	4.65E+03
	評価値	4.73E+03	4.72E+03	4.65E+03	4.65E+03
	誤差[%]	1.19E-01	3.28E-01	-1.84E-01	-1.63E-01

表7 リークケース-非計測プロセス変数

		O ₂ [kW]	O ₁ [kW]	xO ₂ [kJ/h]	ξ[%]
3-A	定常値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	評価値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	誤差[%]	5.00E-07	0.00E+00	-1.47E-05	-8.77E-02
3-B	定常値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	評価値	3.60E+06	7.03E+04	1.10E+07	3.33E-01
	誤差[%]	-9.44E-07	-3.55E-07	-1.44E-05	-5.09E-02

表7 (続き)

		I ₁ [kJ/kg]	I _C [kJ/kg]	I _{F2} [kJ/kg]	I _{F1} [kJ/kg]
3-A	計測値	2.90E+03	5.77E+02	5.77E+02	5.77E+02
	評価値	2.90E+03	5.75E+02	5.79E+02	5.79E+02
	誤差[%]	3.19E-02	2.96E-01	-2.61E-01	-2.85E-01
3-B	計測値	2.90E+03	5.77E+02	5.77E+02	5.77E+02
	評価値	2.90E+03	5.73E+02	5.80E+02	5.80E+02
	誤差[%]	4.18E-02	6.83E-01	-4.50E-01	-4.98E-01

表8に示した結果を見ると、各ケースともボイラ周辺でのリーク値を示す Z_{F2}-Z_Tの値が負になっている。また、ベースケースにおいても値は小さいが、ところどころリーク値が負となっている。計算モデル上、上記リーク値は、それぞれの流量を、目的関数(2-14)式を最小にするように最適化して求めたものの差をとったもので、ベースケースでは、0になるはずであるが、計算誤差によって負になることも考えられる。実際はこのようなことはないので、ベースケースについて、上記4つのリーク値の値が負にならない制約条件を追加して再計算した。結果を表9に示す。上段が制約条件追加なしの計算値で、中段が制約条件を追加した計算値、一番下の行はその2つの誤差を%で示したものである。

表8 リーク量の結果

		Leak: Z _{F2} -Z _T [t/h]	Leak: Z _T -Z _C [t/h]	Leak Z _C -Z _{F1} [t/h]	Leak Z _{F1} -Z _{F2} [t/h]
Base Case	評価値	-1.41E+00	1.43E+00	-3.76E-02	1.34E-02
3-A	評価値	-4.09E+01	5.34E+00	3.51E+01	4.99E-01
3-B	評価値	-8.18E+01	9.89E+00	7.09E+01	9.80E-01

表9 流量制約の追加の影響

		Z ₁ [t/h]	Z _C [t/h]	Z _{F1} [t/h]	Z _{F2} [t/h]
Base Case	評価値	4.7410E+03	4.7400E+03	4.7400E+03	4.7400E+03
流量制約つき	評価値	4.7403E+03	4.7403E+03	4.7403E+03	4.7403E+03
	誤差[%]	1.5095E-02	-5.9963E-03	-5.9944E-03	-5.9934E-03

この結果を見ると、制約の追加による差異は、比率で0.02%以下、流量では0.7[t/h]以下であり、この程度が本計算による数値誤差のおおまかな目安と考えられる。一方、表8のように、復水器の前後でのリークを表す Z_C-Z_{F1}のリーク量の評価値は、(3-A)のケースで35[t/h]、(3-B)のケースで71[t/h]であり、流量の誤差の目安よりも10倍以上大きい。よって、これまでは定性的にも定量的にもプロセスデータの値のみからは検知が難しかったリークを本手法により、リーク箇所の候補とともに発見できる可能性がある。

4.4 関連技術

本研究のアプローチにもっとも近い手法としては、Data Reconciliation[5]手法がある。この手法は、センサの計測値と真値の差の2乗をセンサの許容誤差で規格した総和を最小化する最適化計算により、センサの真値を推定し、センサのエラーを検知する。系統構成に基づく質量バランスは、最適化計算において制約条件として扱われる。

東京電力は、ヒートバランスモデルを用いた状態監視技術を提案している。本研究と同様にして熱交換器の抽気に関する熱バランスを導入することにより、精度よく給水加

熱器の性能の評価ができることを示した[6]。プロセスデータを用いて、あらかじめ用意したヒートバランスモデルをチューニングすることにより評価対象となる系統機器の性能を計算している。

東京電力のモニタリングシステムと、本研究との主な違いは、計器の精度に関するデータを用いて、機器だけでなく、計器の異常も判定することと、リーク箇所を推定できることにある。一方、Data Reconciliation との違いは、質量バランスだけでなく、熱バランスも考慮して、計器の故障だけでなく、機器の性能を推定することにある。また、質量バランスと熱バランスを制約条件としてではなく、最適化対象となる誤差項に組み込んだことにより最適化計算がより簡単になり、計算速度の向上が見込めることも特徴である。

このように、本研究はヒートバランスモデルを用いた状態監視技術と Data Reconciliation 技術の自然な拡張とみることができる。

5. おわりに

計測されたプロセス量と系統・機器の物理的接続関係、およびあらかじめわかっている系統機器に関する物理的・機械的挙動のモデルをもとに状態監視を行う手法を開発した。本研究の成果を以下に示す。

- (1)プラントの状態量を計測値そのものである計測パラメータ、計測パラメータから直接評価されるプロセスパラメータ、直接計器から測定されない非計測パラメータ、および性能パラメータの4つの変数に分類して評価する。性能評価には、全体のパラメータが計測値およびプラントの構成、機器系統の事前知識からあらかじめ得られているエネルギーバランスや質量バランスの誤差項の和、および計器の誤差で規格化した計測値の誤差の項の和を最小にするように全体のパラメータを最適化することにより得る。
- (2)最適化には、微分を用いない非線形最適化手法を実現したオープンソースパッケージである DFO-LS を用いた。これを用いてシステムを実装した。
- (3)提案した手法の有効性を、仮想的なプラントの定格運転データを用いて確認した。その結果、以下のことがわかった。
 - ・計器の誤差項の規格化と質量、エネルギーバランスの誤差項の規格化を適切におこなうことにより、異常箇所、異常計器の同定が可能となる。計器は計測値の1%程度の標準偏差を想定して誤差項を設定し、質量、エネルギーバランスは、質量などの絶対値で規格化するのが適切と考えられる。
 - ・本手法により、微小なリークを正常時のデータとの比較によって、リーク箇所の候補とともに発見できる可能性がある。

参考文献

- [1] 蒸気表関数パッケージ:
<https://iapws.readthedocs.io/en/latest/iapws.iapws97.html>
- [2] DFO-LS Python パッケージ:<https://pypi.org/project/DFO-LS/>
- [3] 古市紀之: “発電用原子炉の出力増強と実流校正設備に関する調査研究”,産総研計量標準報告 Vol.3,No.4 (2005年2月)
- [4] 電験3種ホームページ:

- <https://denken3web.com/blog/denryoku/thermal-power-plant-DR/>
- [5] <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/data-reconciliation>

- [6] 小野繁利: “原子力発電プラント状態監視システムの構築と運用”,平成25年度火力原子力発電大会論文集,(2014/4月)