

ガス導管機能における異常値の迅速な検出

日本理水設計(株) 正会員 下田 剛史

鳥取大学工学部 正会員 野田 茂

1. まえがき

今日、都市ガス供給システムは大規模かつ複雑になってきている。そのため、地震のような災害時にいて、いかに迅速に流量や圧力変化による異常をキャッチするかが重要な課題である。

本研究では、まず、都市ガスの中圧管路網を対象とし、センサーの観測情報を用いて、未観測点における機能(節点負荷、管路流量や節点圧力)をオンラインで時々刻々に予測する。さらに、適応的カルマンフィルター(以下、AKF)によって、導管機能に異常が発生したとき、その発生時刻と異常値を迅速に推定する方法を考案する。その上で、簡単な中圧管路網モデルに対する数値シミュレーションを行い、その有効性を検討する。

2. 機能量のオンライン予測

本研究では、導管網の節点数を n_1 、管路数を n_2 、外部流入出量数を N とし、ガス中圧導管網における未観測量のオンライン予測を行う。

ガスの導管網の基礎式としては、節点における連続式と、管路に関する圧力損失式がある。これらの式をマトリックス表示する。そのうち、未知量からなるベクトルを Z_U ($(n_1 + n_2)$ 次元ベクトル)、既知量からなるベクトルを Z_G ($(n_1 + N)$ 次元ベクトル) とする。 k 時点における Z_G を式(1)の自己回帰式で表し、定数 a_{i0} および自己回帰係数 a_{im} ($m = 1 \sim M$) を状態量にとる。ここでは、この自己回帰式と機能量に関するマトリックス表示式をカルマンフィルター理論に組み込み、未観測量を予測する¹⁾。

$$Z_G(k)_i = a_{i0} + \sum_{m=1}^M a_{im} Z_G(k-m)_i + v_i(k) \quad (1)$$

ここに、 i は $1 \sim n_1 + N$ である。 M は自己回帰式の次数、 v_i は $N(0, \sigma_v^2)$ の正規性白色雑音を意味する。

3. 適応的カルマンフィルターによる異常値検出

時刻 $k = \theta$ において、供給システムには異常が発生する。 $\theta + 1$ 時点においては状態方程式に異常値 $G(\theta)$ が加わる。このように想定し、図1のフローに従った異常値の検出法を以下に述べる。

異常発生判定には一般化尤度比検定を用いる²⁾。このとき、正常値と異常値に対するイノベーション系列の尤度比は、 $k = \theta$ において、最大となる。この尤度比を最大にする異常値 $\hat{G}(\theta)$ が導出され、一般化尤度比が求まる。ここでは、一般化尤度比を用いて、異常検出指標(ϕ_*)を定義する。この異常検出指標がある閾値 η を超過したとき、異常が発生したとみなす。

時点 θ は次のようにして求める。 k 時点の異常値は $k + l$ 時点で計算された ϕ_* によって検出される。今、時点 j_η で計算された ϕ_* (k_η 時点) が η を超過したとする。異常値は、 $k_\eta + 1$ から j_η までのイノベーションを用いると、判定される。従って、 k_η から $j_\eta - 1$ 区間において、異常発生時点が存在する。このとき、最大の ϕ_* を与える時点が求める $\hat{\theta}$ である。 $\hat{\theta}$ を用いると、異常値 $\hat{G}(\theta)$ が得られる。そこで、最終判定時点 $j_\eta + 2l - 1$ において、状態量と推定誤差共分散の修正を行う。

4. 数値計算結果と考察

図2の簡単なモデル(節点数 $n_1 = 4$ 、総管路数 $n_2 = 5$ と外部流入量 $N = 1$) に対する数値シミュレーションを実施する。流量計と圧力計によって、3つの管路流量(Q_{12} 、 Q_{23} と Q_{34}) と1つの節点圧力 P_3 が観測される。節点圧力 P_1 と負荷 q_4 には異常値を仮定する。

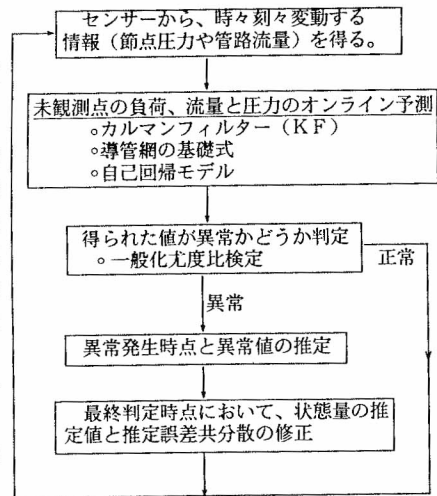


図1 研究方法のフローチャート

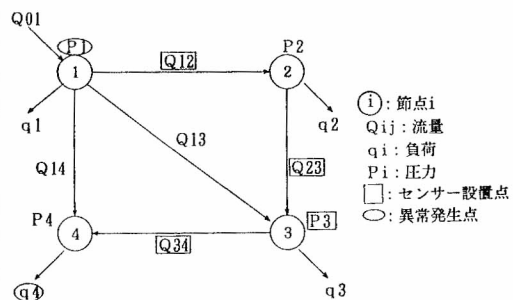


図2 計算に用いた簡単なガス導管網

まず、式(1)の自己回帰式を用いて、 $(n_1 + N)$ 個の Z_G (5つの節点負荷 q と基準節点圧力) を模擬発生させる。次数 M は2とする。定数 (a_{i0}) と自己回帰係数 (a_{i1} と a_{i2}) および雑音 $v_i(k)$ の標準偏差 σ_i は表1のようである。初期値を与えて、 Z_G の時系列データ (160 時点) を作成した。異常データは、時点80前後の P_1 と q_4 に対して、表1に示すように定数と自己回帰係数を変化させて求めた。ここでは、この模擬発生させた Z_G を用いて、各時点毎に管網計算を行い、 Z_G 以外の機能量すなわち Z_U を算出した。このようにして得られた Z_G と Z_U を真値とみなす。

l は13、 η は4.0とする。さらに、システム雑音と観測雑音の共分散行列、状態量の初期推定値およびその共分散行列の初期値を設定する。その上で、3.で述べた適応的カルマンフィルターにより、 Z_G と Z_U の1時点先の予測を行う。図3は、節点4における負荷 q_4 の予測結果および状態量としての自己回帰係数 $a_{4,2}$ の同定結果を示したものである。

図4は異常検出指標 (ϕ_*) である。時点71において、 ϕ_* は $\eta = 4.0$ を超過している。すなわち、 $k_\eta = 71$ である。従って、 θ は $k_\eta + l - 1 = 83$ までに存在する。この間の ϕ_* の最大時点として、時点80が得られる。この時点を実験発生時点と判定する。

図3に示した時点80以降の予測結果を見ると、真値に追従していることがわかる。修正時点96以降に対し、AKFによる予測値は通常のカルマンフィルターよりも多少早く真値に近づいている。しかし、2つの手法による相違はあまり見られない。これは、図3の如く、通常のカルマンフィルターによって、状態量が真値へ迅速に追従するためである。このことは図4にも現れている。すなわち、AKFによる修正以前に、 ϕ_* は収束している。

5. あとがき

本研究では、都市ガス導管網を対象として、迅速な異常値検出を試みた。AKFによると、理論的には異常発生後の真値への追従は迅速に行われる。しかし、ここで採用したモデルシミュレーションの例では、通常のカルマンフィルターに比べて、必ずしも真値への追従性が高くなかった。これは単純なモデルの採用と観測データの組み合わせによるものと考えられる。今後は、さらに複雑なモデルを用いて、本手法の有効性を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 河村明・神野健二・上田年比古・小谷辰士：自己回帰モデルによる配水管網系の節点需要量のオンライン予測、九州大学工学集報、第62巻、第2号、pp.83～90、1989年3月。
- 2) 上田年比古・河村明・神野健二：適応的カルマンフィルターによる異常値検出について、土木学会論文集、II-1/No.345、pp.111～121、1984年5月。

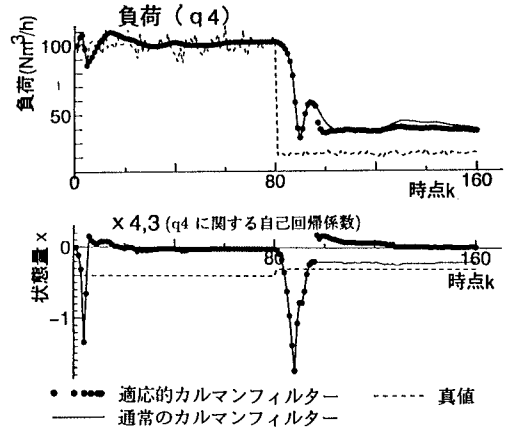


図3 負荷の予測結果 q_4 と自己回帰係数 $a_{4,2}$ の同定結果

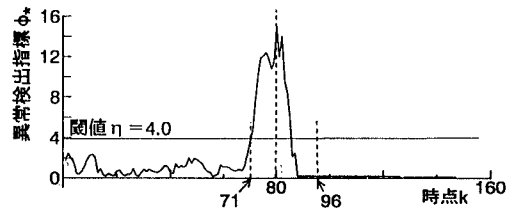


図4 異常検出指標 (実際には時点 $k = 80$ で異常発生する。異常検出指標は時点71で閾値を越える。AKFによって状態量は時点96で修正される。)

表1 負荷と圧力 Z_G の設定値 [初期値、自己回帰係数 a_{im} 、ノイズの標準偏差 σ_i と異常値 $G(\theta)$]

Z_G				Z_G の初期値		定数	自己回帰係数		標準偏差
				$Z_G(-1)$	$Z_G(-2)$		a_{i0}	a_{i1}	
負荷	正常		$q_1(k)$	95	90	6.5	0.7	0.3	6.0
			$q_2(k)$	30	28	15	1.5	-0.7	2.0
			$q_3(k)$	55	50	11	0.8	-0.1	3.0
	異常発生	$q_4(k)$	$1 \leq k \leq 80$	90	80	15	1.3	-0.4	5.0
			$81 \leq k \leq 160$	—	—	19	0.3	-0.3	1.0
			異常値 $G(\theta)$	—	—	4.0	-1.0	0.1	—
圧力	異常発生	$P_1(k)$	$1 \leq k \leq 80$	1.18	1.16	0.6	0.8	-0.3	0.0
			$81 \leq k \leq 160$	—	—	0.5	0.5	0.1	0.0
			異常値 $G(\theta)$	—	—	-0.1	-0.3	0.4	—

単位 $q: \text{Nm}^3/\text{h}$ 、 $P: \text{kg}/\text{cm}^2$