

■ 研究論文 ■

ガスパイプラインのシミュレーション方式漏洩検知技術

Leak Detection Technique for Gas Pipeline by Means of Real-Time Flow Simulation

吉田 雅裕*・山口 以昌*・佐藤 律夫*

Masahiro Yoshida Isho Yamaguchi Ritsuo Satoh

(1994年11月25日 原稿受理)

Abstract

The use of natural gas is on the upward trend as a clean energy resource, and proportional to it, the domestic network of gas transmission pipeline has been extended. NKK Corporation has developed the Gas Pipeline Operation Supporting System to ensure reliability and safety on its operation. Simulation-based leak detection is one of the main functions of the system, and its detection accuracy could be improved by a newly designed statistical method. Experimental evaluation of its performance was conducted with testline (4" x 1430m) and compressed air. As the result, 0.2% leak under steady flow was successfully detected.

1. 緒 言

環境問題に対する世論の高まりの中で、CO₂の排出量が少ないクリーンなエネルギーとして天然ガスが注目されており、火力発電や都市ガスなどの分野で燃料の天然ガス転換が進んでいる。これに伴い、その輸送手段としてのパイプラインの新設プロジェクトが、数多く進行中である。

天然ガスのパイプライン輸送において最も懸念されることはガスの漏洩による災害発生であり、ガスパイプラインが普及している欧米においては、毎年少なからぬ漏洩事故が報告されている。漏洩の発生を早期に検知する手段はこれまでも様々な技術開発がなされているが、ガス検知や音響法などの直接的な方法と、流送シミュレーションによる間接的な方法に大別される。

ここで報告する流送シミュレーション方式の漏洩検知とは、パイプライン内のガス流れを計算機上でオンライン・リアルタイムでシミュレーションしながら、それによる圧力や流量などの計算値と、対応する測定値とを比較し、両者の偏差が急激に増大した場合に漏

洩が発生したとみなすものである。こうした検知手法については、これまでも数多くの研究がなされており、ラインに沿った圧力の偏差(計算値と測定値との差)に着目する方法、境界における流量の偏差に着目する方法^{1,2)}、パイプに流入・流出する流量のマスバランスに着目する方法³⁾、さらに比較的新しい手法として、ラインを圧力測定区間ごとに独立したセクションに分割し、セクションごとのシミュレーションからマスバランスを計算する方法⁴⁾などが提案されている。

著者らは、マスバランス法と圧力偏差法を組み合わせることにより総合的に漏洩発生の判定を行う方法を考案し、テストライン(4"×1430m)実験の結果、極めて精度の高い検知性能を確認したので、その概要を報告する。

2. ガスパイプライン運転支援システム

2.1 システム構成

シミュレーション方式による漏洩検知技術は、ガスパイプライン運転支援システム⁵⁾の一機能として開発したものであり、ここではまずシステムの全体について述べる。

* NKK エンジニアリング研究所
〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1

吉田雅裕(現在の所属)
NKK パイプラインシステム技術部
〒230 横浜市鶴見区末広町2-1

同システムは、図-1に示すような複数のプロセスから構成されている。このように機能ごとに独立したプロセスを組み合わせているため、ユーザーニーズに合わせた機能の追加や削除が容易にできる。図に示した各機能の役割は次のとおりである。

- MDA (Measured Data Acquisition)
SCADAシステムから測定データを取り込み、統計処理を行う。
- RTS (Real Time Simulation)
測定値を境界条件とし、実時間と同期して流れのシミュレーションを行う。
- LDL (Leak Detection and Location)
測定値とRTS計算値との偏差の変動状況から、漏洩の検知と位置推定を行う。
- PMT (Parameter Tuning)
測定値とRTS計算値がなるべく一致するように、シミュレーションモデルに含まれる未定パラメータを同定する。
- FCS (Forecast Simulation)
RTS計算値を初期値とし、運転計画や操作シナリオに基づいて将来予測のための先行シミュレーションを行う。
- MMI (Man-Machine Interface)
測定値や各種計算値をビジュアル化して表示するとともに、操作員からの入力を受け付ける。

2.2 流送シミュレータ

システムの中核となる非正常流れシミュレータの解法には特性曲線法を採用しており、また、パイプラインの構成要素としてLNG気化設備、コンプレッサ、各種バルブ、ホルダ、制御系、分岐合流の各モデルを

内蔵している。システム内では、このシミュレータの動作方法を変えて、実時間シミュレーション (RTS)、パラメータチューニング (PMT)、および先行予測シミュレーション (FCS) の3つの機能に適用している。

3. パラメータチューニング方法

3.1 チューニングの目的

パイプライン流れの基礎方程式の中には、パイプの総括熱伝達係数のように直接測定することが困難なパラメータが含まれており、これらを正確に推定しなければ精度良いシミュレーション結果を得ることはできない。この未定パラメータの推定には、ライン中のいくつかの状態変数について測定値と計算値がなるべく一致するように、両者の偏差に対して最小化手法が適用される。本システムでは、こうした処理を行うプロセス (PMT) が実時間シミュレーション (RTS) と並行して自動的に実行されるようになっている。

3.2 チューニング対象のパラメータ

ここで作成したパラメータチューニングプログラムでは、ネットワーク状のパイプラインを構成する複数のパイプについて、それぞれのパイプライン効率、総括熱伝達係数、周囲温度の3種類のパラメータをチューニング対象としている。このとき、全てのパイプについて各パラメータを独立なものとして扱おうと、複雑なパイプラインでは計算量が膨大になり、また、計算結果の信頼性も低下する恐れがある。そこで、パラメータの真値がほぼ等しいと思われるパラメータ同士をグループ化して、未定パラメータの数を減らすオプション機能を設けている。

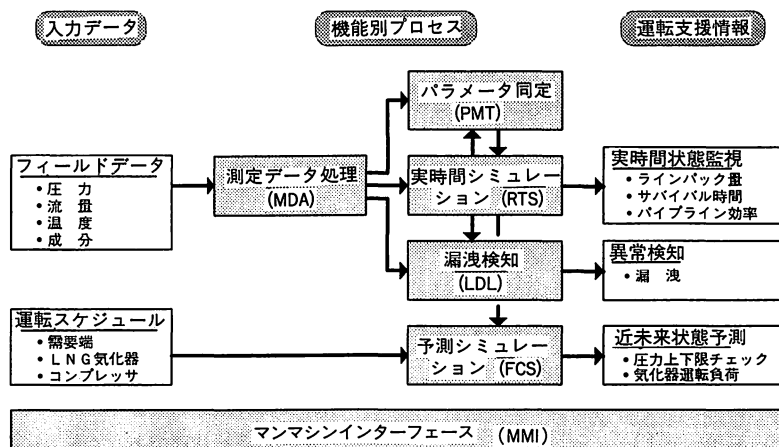


図-1 ガスパイプライン運転支援システムの基本構成

3.3 解法

PMTを開始する際には、その時点での最新のRTS計算値をプロセス間の通信によって取得すると共に、一定時間、シミュレーション境界用と比較用の測定値をサンプリングする。その後、RTS計算値を初期値とし、次式で定義される残差二乗和Sが最小になるように、パラメータ値を変えたシミュレーション計算を繰り返す。

$$S = \sum_k \sum_i w_i^k \left[y_i^k - f_i^k(x) \right]^2 + \sum_j w_{xj} \left[x_j - x_j^{(0)} \right]^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 y_i^k , w_i^k , $f_i^k(x)$ はそれぞれ比較用測定値、その重み（測定値の分散などから求める値）、パラメータ x に対するシミュレーション計算値であり、下添字 i は同一時刻における測定値の違いを、上添字 k は同一測定値の時刻による違いを意味している。また、右辺第2項は、前回の実行結果であるパラメータの現在値 $x_j^{(0)}$ から偏逸することに対するペナルティを表しており、統計学で緩い束縛条件あるいは先験条件と呼ばれるものに相当する。この場合の重み w_{xj} としては、最小二乗計算の結果から副次的に求まる推定誤差に関する値を与えるようにした。

(1)式の具体的な解法としては、Gauss-Newton法系の非線形最小二乗法である Levenberg-Marquardt 法とPowellのハイブリッド法⁶⁾の2種類を内蔵しており、いずれかを選択するようにしている。

4. 漏洩検知方法

4.1 統計的データ処理方法

測定値と計算値との偏差に関する過去の時系列データから、現在の偏差の正常性を検定する場合、通常はティ分布が適用される。すなわち、無限大の母集団から採取した独立な2組の標本群(0, 1)において、ティ分布による平均値の差の検定は、一般に次式によって行われる。ここで、統計量 t は自由度 $\phi = n_0 + n_1 - 2$ のティ分布を定める。

$$t = \frac{\bar{x}_0 - \bar{x}_1}{\sqrt{\frac{V}{n_0} + \frac{V}{n_1}}} \dots\dots\dots (2)$$

式中で、 n_0 , n_1 は各標本群のデータ数、 \bar{x}_0 , \bar{x}_1 はそれぞれの平均値、 V は共通の不偏分散を表す。

$$V = \frac{1}{(n_0 - 1) + (n_1 - 1)} \times$$

$$\left[\sum_{j=0}^{n_0-1} (x_{0j} - \bar{x}_0)^2 + \sum_{j=0}^{n_1-1} (x_{1j} - \bar{x}_1)^2 \right] \dots (3)$$

ここでは、式(2)を改良して、時系列データの単純移動平均値の定常性に対する検定式として、式(4)を提案する。すなわち、現時点から過去に向かって n_0 個の時系列データと、さらにそれ以前の n_1 個のデータについて、各要素が互いに独立でトレンド性がないと仮定すると、次のようにできる(補足説明参照)。

$$t = \frac{\bar{x}_0 - \bar{x}_1}{\sqrt{\frac{2V}{n_0^2} + \frac{2V}{n_1^2}}} \dots\dots\dots (4)$$

この値からティ分布の片側検定によって、「異常(漏洩)なし」という仮説の棄却危険率 α の値を算出する。この α は 0~1 の値をとり、その時点で異常ありと判定したときにそれが誤警報となる確率を意味する。なお、 t と ϕ から α を求める計算は、プログラムに内蔵したティ分布表を補間するようにした。

4.2 検知手法

漏洩の検知手法は、次の2種類の手法を併用した。

① マスバランス法

パイプライン全体あるいはその中の一部のセクションについて、次式で定義されるラインバック量変化速度の偏差を算出し、その値が異常に正の方向に変移した場合に漏洩発生とみなす。

$$\Delta LP(t) = LP_{measd}(t) - LP_{calcd}(t) = \sum_{k=1}^m Q_k_{measd}(t) - \sum_{k=1}^m Q_k_{calcd}(t) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 Q は境界端において当該セクションに流入する方向を正とする流量、 m は境界端の数である。

② 圧力偏差法

ライン途中に設置された圧力計の測定値とそれに対応するシミュレーション計算値を比較し、次式で定義される偏差を検定する。

$$\Delta P_k(t) = P_{k,measd}(t) - P_{k,calcd}(t) \dots\dots (6)$$

漏洩が起これるとこの偏差は負側に変移するので、左側片側検定を行う。複数の圧力計が連続して設置されている場合、測定点毎に検定結果としての棄却危険率が求められるが、隣接する2点同士の幾何平均を求め、そのうちの最小の値を、この手法の判定結果として採用する。

4.3 漏洩判定

正常な運転状態であっても、測定値のばらつきによって計算値との偏差が増大する場合がある。このとき、

マスバランズ偏差と圧力偏差が共に漏洩発生時と同じ向きに変移することはないため、両者を組み合わせることにより誤警報を防止することができる。

複数の検知手法を併用して総合的に漏洩の判定を行う場合、例えば統計量 t の重み付き算術平均を用いることが考えられるが、自由度 ϕ によってティ分布の形状は相似でないので好ましくない。また、カイ平方など他の検定手法と混在するにも不都合である。そこで、ここでは各検知手法の検定結果を棄却危険率 α の値で表し、これから総合的な棄却危険率 α_{total} の値を重み付き幾何平均によって計算することにした。さらに、突発的な異常値の影響を排除するために、 α_{total} について任意の時間回数の幾何平均をとるようにしている。

この平均化された α_{total} が、あらかじめ設定したしきい値を下回った場合に漏洩発生と判定する。

4.4 検知精度に関する考察

4.4.1 検知下限漏洩量

上述の2つの検知手法のうち、マスバランズ法の方が漏洩に対する感度が高いことから、総合判定を行う際には圧力偏差法に比べて重みを大きくしている。そこで、ここではマスバランズ法を取り上げ、漏洩検知精度、すなわち検知限界と検知時間の推定方法について考察する。

いま、式(4)の右辺分子を検知下限の流量差 ΔQ_{min} で置き換えると、次式を導くことができる。

$$\frac{\Delta Q_{min}}{\sqrt{V}} = \frac{2}{n} t(2\alpha, \phi) \dots\dots\dots (7)$$

ただし、移動平均点数については $n_0 = n_1 = n$ とした。右辺の t は両側棄却危険率(片側棄却危険率 α の2倍)と自由度 $\phi (= 2n - 2)$ を与えればティ分布表から一意的に決まる値であるから、上式は任意の α に対する $\Delta Q_{min} / \sqrt{V}$ と n の関係を表すことになる。

図-2は、3とおりの α についてこの関係を図示したものである。対象とするラインの運転データを入手できれば、シミュレーションを行ってその計算値と測定

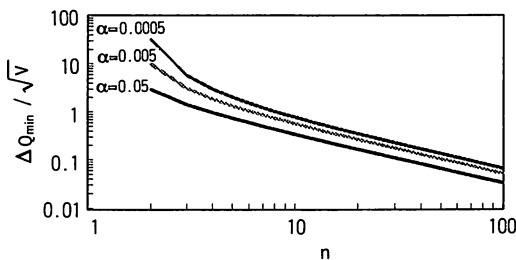


図-2 検知下限漏洩量と移動平均点数の関係

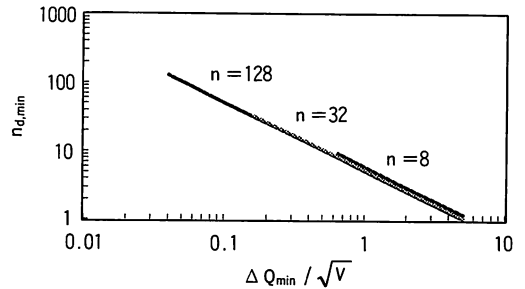


図-3 検知までの最小時間ステップ数と漏洩量の関係

値との偏差の分散 V を求めることにより、この図から検知下限 ΔQ_{min} と移動平均点数 n の関係を推定することができる。

4.4.2 検知時間

次に、検知までの所要時間について考察する。検知までの時間ステップ数を n_d とすると、任意の漏洩量 ΔQ を検知できる条件は、単純移動平均を適用した場合、

$$\frac{n_d}{n} \Delta Q \geq \Delta Q_{min} \dots\dots\dots (8)$$

と近似できることから、(7)式を代入して漏洩量と検知までの最小時間ステップ数 $n_{d,min}$ の関係を導くことができる。

$$n_{d,min} = 2 \frac{t(2\alpha, \phi)}{\Delta Q / \sqrt{V}} \dots\dots\dots (9)$$

この関係を図示すると図-3のようになり、移動平均点数 n にはあまり依存しないことがわかる。

5. テストライン実験

5.1 実験装置

実験に使用したテストラインは、図-4に示すように、管径 4" (内径 105.3mm)、全長約 1430m で、入口に設置された2台のスクルーコンプレッサ (7 kgf/cm²G、630 Nm³/h × 2) から空気が供給される。運転方法は、入口圧力-出口流量制御である。ライン途中の3ヶ所で疑似漏洩ラインが接続しており、そこには漏洩流量調整用のニードル弁、流量計、漏洩の開始・終了を行うための電磁弁が設置されている。

ライン入口・出口の圧力、流量、温度、およびライン途中の6ヶ所に設置した圧力計の信号は、A/Dコンバータと LAN を経てエンジニアリングワークステーション (SGI Indigo R4000) に取り込んだ。ワークステーション上ではパラメータチューニング、漏洩検

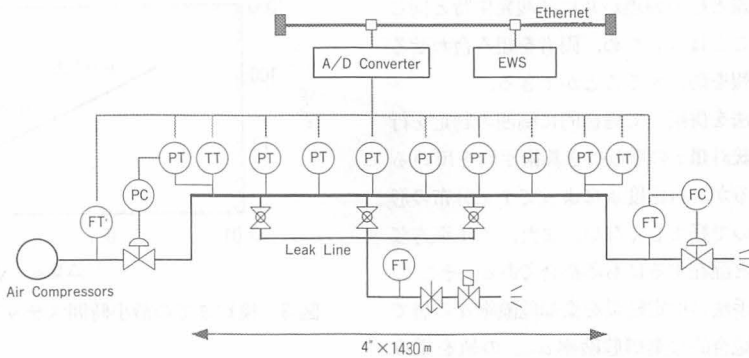
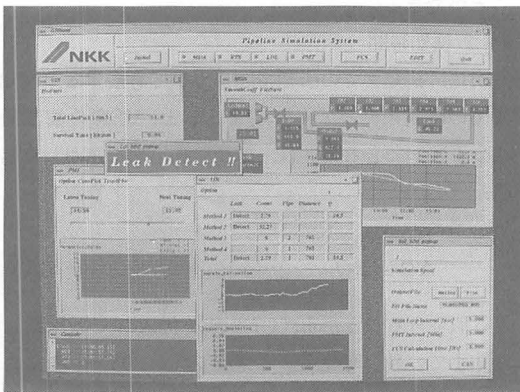


図-4 テストラインの概要



写1 実験用システムの画面

知機能を含むオンライン・リアルタイムシステムが稼働している。写1に実験用システムの画面を示す。

5.2 シミュレーション条件

流送シミュレーションの実行条件は、入口圧力・出口圧力境界、ライン分割数22、計算時間ステップ（境界値の取込間隔）5sとした。

5.3 パラメータチューニング実験

パイプライン効率[-]、総括熱伝達係数 $[W/m^2 K]$ 、周囲温度 $[^{\circ}C]$ の3つの未定パラメータを、オンラインで同時にチューニングした。チューニングの比較用測定値としては、入口流量、出口流量、出口温度、中間地点圧力の4つを選んだ。チューニングプロセスの実行間隔は任意に設定できるが、ここでは連続実行（収束計算が終了したら直ちに次の計算のための測定値サンプリングを開始）するように設定した。チューニング用シミュレーション時間は120sとした。

図-5にパラメータ収束値の経時変化を示す。同図(a)は式(1)右辺第2項で表されるパラメータ変動のペナルティを設定しない場合であるが、数回の実

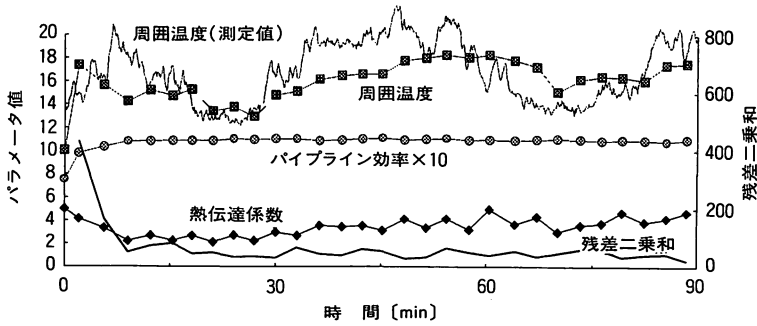
行後に各パラメータとも物理的に妥当な値に収束している。一方、同図(b)はペナルティを設定した場合であり、パラメータの短期的な変動が抑制されていることがわかる。

5.4 漏洩実験

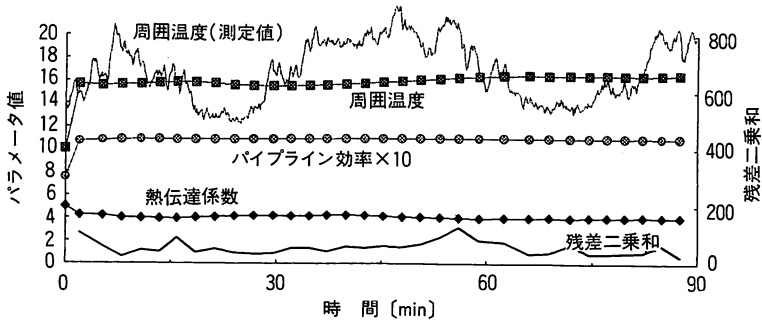
漏洩流量や漏洩位置を変えた実験を行い、漏洩検知性能を検証した。入口圧力 $4 \text{ kgf/cm}^2 \text{ G}$ (0.49 MPa)、 $900 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 定常運転時に0.2%の漏洩を発生させたときの棄却危険率の変動状況を、図-6に示す。いま、棄却危険率の値はティ分布の片側のみを考えているので、正常時には縦軸の値は0.5を中心にして分布している。横軸は漏洩発生時刻に対する相対時間を表しており、縦軸の値がしきい値を下回った時点で漏洩発生と判定される。

検知できた漏洩量の下限は、定常状態では図-6に示した0.2%であり、6min間に出口流量を5倍もしくは1/5倍にランプ状に増減する非定常状態では2~3%であった。

この結果を4.4で述べた検知精度に関する推定式と比較してみる。マスバランスについての変動の分散は $\sqrt{V} \approx 11.0 \text{ [Nm}^3/\text{h]}$ であったので、移動平均点数 $n = 32$ 、漏洩判定の片側棄却危険率 $\alpha = 0.005$ とすると、式(7)より $\Delta Q_{\min} = 1.8 \text{ Nm}^3/\text{h}$ となる。これを総流量 $900 \text{ Nm}^3/\text{h}$ に対する割合に直すと、0.20%となり、0.2%の漏洩を検知した実験結果は検知下限ぎりぎりであったことがわかる。また、検知時間については、0.2%漏洩時($\Delta Q_{\min} = 1.8 \text{ Nm}^3/\text{h}$)における最小時間ステップ数は式(9)から32となり、これに1ステップあたりの時間刻み5sを掛けて、検知時間は160sと求まる。

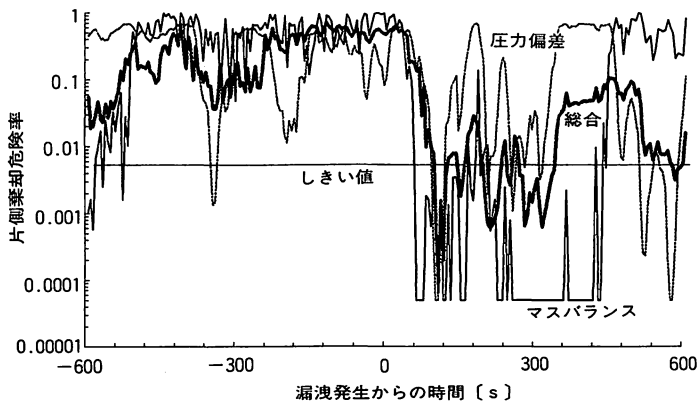


(a) パラメータ変動のペナルティなし



(b) パラメータ変動のペナルティあり

図-5 パラメータチューニングの収束状況



(定常運転, 0.2%漏洩)

図-6 漏洩発生前後における棄却危険率の変動

6. 結 言

ガスバイブライン運転支援システムの中核機能の 1 つとして、シミュレーション方式の漏洩検知技術を開発した。

(1) 漏洩検知精度はバイブライン非定常流れシミュレーションの精度に大きく依存することから、シミュ

レーションモデル中に含まれる未定パラメータを自動的にチューニングするプログラムを開発し、テストラインによるオンラインチューニング実験により良好な結果を得た。

(2) マスバランス法と圧力偏差法を組み合わせ、さらに検定方法として改良型ティ検定を採用することにより、微小な漏洩の検知が可能になった。テストライ

ン実験での検知下限流量は、定常流れ状態で総流量の0.2%、非定常流れ状態で同じく2~3%であった。

(3) 検知精度は測定値とシミュレーション計算値との偏差の変動状況に依存するが、変動の分散値から検知下限漏洩量と検知時間を推定する式を示した。また、紙面の都合で説明を省略したが、圧力の偏差のラインに沿った分布状況から、概略の漏洩位置を推定することも可能であった。

参考文献

- 1) Pringle, S. and Bednorz, M.; Pipeline Engineering Symposium, ASME (1989), 13-29
- 2) Ellul, I. R.; Underground Storage of Natural Gas, Kluwer Academic Publishers (1989), 217-230
- 3) 木内龍彦; 機論(B), vol. 57, No. 540 (1991), 2784-2790
- 4) Nichoras, R. E.; Pipeline Engineering Symposium, PD-Vol.6, ASME (1987), 13-20
- 5) 佐藤, 吉田ほか; 平成4年度火力原子力発電大会講演予稿集 (1992)
- 6) 中川, 小柳; 最小二乗法による実験データ解析 (1982), 東京大学出版会

補足説明

n 個の連続データ $\{x_i\}$ の単純移動平均とその回りの不偏分散 V_i は、次式で表される。

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_{i-j} = \bar{x}_{i-1} + \frac{1}{n} (x_i - x_{i-n})$$

$$V_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} (x_{i-j} - \bar{x}_i)^2$$

このとき、移動平均の更新値 \bar{x}_i に関して、前回値 \bar{x}_{i-1} の回りの分散 \bar{V}_i を求めると、もとのデータが完全にランダムな場合、次のようにできる。ここで、 $\langle \rangle$ は期待値を表す。

$$\begin{aligned} \langle \bar{V}_i \rangle &= \langle (\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1})^2 \rangle = \frac{1}{n^2} \langle (x_i - x_{i-n})^2 \rangle \\ &= \frac{1}{n^2} \langle [(x_i - \bar{x}_i) - (x_{i-n} - \bar{x}_i)]^2 \rangle \\ &= \frac{1}{n^2} \langle (x_i - \bar{x}_i)^2 + (x_{i-n} - \bar{x}_i)^2 \rangle \\ &= \frac{2}{n^2} \langle V_i \rangle \end{aligned}$$

協賛行事ごあんない

「最近の廃棄物燃焼技術」開催について

〔日 時〕 平成7年6月15日(木), 16日(金)

〔会 場〕 梅田センタービル31階三田出版会大会議室

〔内 容〕

・6月15日(木) 10:00~17:00

- ・廃棄物燃焼における有害物質の発生とその対策 (地球環境システム工学研究所所長 平岡正勝) 他4件

・6月16日(金) 9:40~15:30

- ・廃棄物の流動層燃焼 (三菱重工業(株)主管 藤間幸久) 他3件

〔申込締切〕 6月14日(木)

〔定 員〕 100名

〔参加料〕 会員 30,000円, 会員外50,000円等

〔申込先〕 社団法人日本機械学会関西支部

〒550 大阪市西区鞆本町1-8-4

大阪科学技術センタービル内

Tel 06-443-2073