音響センサを用いたボイラ内温度分布計測[†]

田中正吾*・廣澤 聡*・佐伯正裕*

Measurement of Temperature Distribution in Boilers Using Acoustic Sensors[†]

Shogo TANAKA*, Satoshi HIROZAWA* and Masahiro SAEKI*

Knowing the temperature inside boilers is important to control fuel injections efficiently. To measure the temperature, methods such as ones using a thermocouple and a radiation thermometer have been adopted. But, the former has a difficulty in its durability and the latter applicable only for measuring the temperature near the wall. Different from these, recently the technique of CT (computed tomography) has been well known and become to be applied to the measurement of the temperature. This is because it enables a high level measurement of the temperature, i.e., the measurement of the temperature distribution. But, a step-wise approximation of the distribution has been adopted for simplicity.

This paper proposes a new approach representing the distribution as a linear combination of Gaussian functions and a bias, and demonstrates the effectiveness. Furthermore, the optimal sensor location is discussed to improve the measurement accuracy.

Key Words: temperature distribution, acoustic sensor, computed tomography, Gaussian functions, optimal sensor location

1. 緒 言

ボイラ内の温度分布が計測できれば、ボイラ内部を的確に把握できることになり、結局はボイラの稼働率の向上に役立つ。

ボイラ内の温度情報を得るひとつの方法としては、熱電対を用いる方法(接触式計測法)があるが、これだと熱電対先端付近の温度しか測れないだけでなく、耐久性の点でも難点がある。また、これとは別に、放射温度計を用いる方法、つまり赤外線を利用する温度測定法もあるが、ボイラ内温度分布の極く外側の温度、つまりボイラ壁近くの温度しか測定できないという欠点がある。このような観点から、最近では、ボイラ内の温度あるいは温度分布の計測法として、音の伝播を利用した方法も考えられている^{1)~3)}。この方法では、非接触で計測できるだけでなく、CT (computed tomography)手法を用いることにより温度分布を計測できるという利点もある。

しかしながら、これまでのCT手法では、測定領域を小さな要素(セル)に分割し、この要素内の温度は一定であると仮定した温度分布計測方法が採られて来た。そのため、高精度な計測は望めなかった。仮に、この方法で高精度な計測を実現しようとするれば、必然的に測定領域を多くの要素に分割する必要がある、そのため多くの音響センサを必要とし、結果と

してコストの増加やボイラ壁の強度の劣化などを招く。

このため本論文では、複数のガウス形関数を一次結合したものにバイアス成分を加える方式により温度分布を計測することを考える。この方式により、測定領域全体の温度分布をわずかな未知パラメータで滑らかな関数として表わすことができ、結果として、音響センサの数が少ない場合でも高精度で滑らかな温度分布の計測が可能となる。なお、音響センサを数多く設置できない場合は、設置場所によっては温度分布に関する十分な情報が得られず、計測精度が悪化することが考えられるので、本論文では、このような場合に対しても、温度分布を高精度に計測できる最適センサ配置について検討する。

2. ボイラ内温度分布計測について

気体中を伝播する音速 c は、次のように温度の関数として表わされる。

$$c = \alpha\sqrt{T} \quad (1)$$

ここで、 α は気体中のガス組成によって定まる定数であり、 T はその点での温度(絶対温度)を表わす^{1)~3)}。いま、温度が分布している領域内の2点間を音波が伝播すると、そのときの伝播時間はその線分上の温度分布を反映する。具体的には、2点を結ぶ線分を s 座標で表わし、線分上の温度をこの線分に沿って $T(s)$ で表わせば、線分上の微小区間 $[s, s + ds_j]$ を伝わる伝播時間は

$$dt_j = ds_j/c = ds_j / (\alpha\sqrt{T(s)}) \quad (2)$$

で表わされる。したがって、伝播時間 t_j は(2)式をその伝播

[†] 第7回 SICE 中国支部学術講演会で発表 (1998・11)

* 山口大学工学部 宇部市常盤台 2-16-1

* Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube
(Received March 25, 1999)
(Revised June 24, 1999)

Fig. 1 Measurement of the temperature distribution

Fig. 2 Sound propagation path

経路 S_j に沿って線積分した

$$t_j = (1/\alpha) \int_{S_j} \left(1/\sqrt{T(s)}\right) ds_j \quad (1 \leq j \leq N) \quad (3)$$

で求める (Fig.1 参照). ここに, N は伝播経路の総数である. 具体的な音波伝播時間の計測については, たとえば文献 2), 4) を参照されたいが, 以下, 伝播時間が得られたとして温度分布計測を考えることにする.

いま, Fig.2 に示すように, ボイラの側壁に音響センサを多数設置する. なお, 各音響センサは, 送波, 受波の両機能を有することとする. このとき, 音響センサが設置されている 2 次元平面内での温度分布計測を考えてみるが, その際, 測定領域内の温度分布をパラメータ化するため, Fig.3 に示すような (測定領域内の) 正三角格子状の格子点に中心をもつ多数のガウス関数

$$f_i(x, y) = \exp \left[-\frac{\{(x-X_i)^2 + (y-Y_i)^2\}}{2\sigma^2} \right] \quad (4) \quad (1 \leq i \leq M-1)$$

を考える. ここで, σ はガウス関数の空間的広がりを表わす定数であり, 温度分布が滑らかに計測できるように選ばれる. 詳細は文献 5) を参照されたいが, σ は隣接格子点間距離を r として, $0.74 r \leq \sigma \leq 0.93 r$ にすることが望ましい.

これらの関数を用いて温度分布を計測するわけであるが, ここでは解析の都合上, $(\sqrt{T(x, y)})^{-1}$ を上述のガウス関

Fig. 3 Location of centers of the Gaussian functions

数 $\{f_i(x, y)\} (1 \leq i \leq M-1)$ と関数 $f_M(x, y) \equiv 1$ の M 個の関数の一次結合で表わすことにする. つまり,

$$\left(\sqrt{T(x, y)}\right)^{-1} = \sum_{i=1}^M c_i f_i(x, y) \quad (5)$$

これは, 後述するように計測システムを簡単にする (オンライン性のため) だけでなく, $T(x, y)$ それ自身より却って $1/\sqrt{T(x, y)}$ の方が $T(x, y)$ よりも値の変化が抑えられるということ (後述の数値例参照), および, ガウス関数の数さえ適切に与えれば, ガウス関数の一次結合により一定値をとる関数から種々の複雑な形状の関数まで多くの関数が高精度に近似できる⁵⁾ことを考えたからである. このようにモデル化されるとき, Fig.2 に示す音響センサの配置法に対し, 各伝播経路での音波伝播時間を求めてみよう. ここでは, 一般的に, 伝播経路 S_j に対する伝播時間 t_j を求めてみる. このとき, 各ガウス関数の中心座標 (X_i, Y_i) から対象とする伝播経路 S_j に下ろした垂線の足が伝播経路上にあるか否かで計算式が異なる. まず, 垂線の足が伝播経路上にあるときを考えると, 伝播時間 t_j は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} t_j &= \frac{1}{\alpha} \int_{S_j} \left(\sqrt{T(x, y)}\right)^{-1} ds \\ &= \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^M c_i \int_{S_j} f_i(x, y) ds \\ &= \frac{\sqrt{2\pi}\sigma}{\alpha} \sum_{i=1}^{M-1} c_i \exp \left(-\frac{p_{ij}^2}{2\sigma^2} \right) \\ &\quad \times [\operatorname{erf}(s_1^j) + \operatorname{erf}(s_2^j)] + \frac{1}{\alpha} c_M s_d^j \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, $\operatorname{erf}(x)$ は誤差関数

$$\operatorname{erf}(x) \triangleq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt \quad (x > 0) \quad (7)$$

を表わす. また, s_d^j は伝播経路 S_j の長さ, つまり伝播経路 S_j の両端の音響センサの間の距離を表わす. さらに p_{ij} は, ガウス関数 $f_i(x, y)$ の中心 (X_i, Y_i) から経路 S_j に下した垂線の足の長さを, また s_1^j, s_2^j は, それぞれこの垂線の足から経路 S_j の両端の音響センサまでの距離を表わす.

次に, 垂線の足が伝播経路の延長線上に落ちる場合は, 詳細は略すが, (6) 式と同様にして伝播時間 t_j は次のように求め

られる。

$$t_j = \frac{\sqrt{2\pi}\sigma}{\alpha} \sum_{i=1}^{M-1} c_i \exp\left(-\frac{p_{ij}^2}{2\sigma^2}\right) \times [\operatorname{erf}(s_{up}^j) - \operatorname{erf}(s_{low}^j)] + \frac{1}{\alpha} c_M s_d^j \quad (8)$$

ただし、このときの s_{up}^j, s_{low}^j は、それぞれ垂線の足から遠距離側および近距離側の音響センサまでの距離を表わす。

結局、各伝播経路に対し、(6)式あるいは(8)式のタイプの方程式が得られる。つまり、伝播経路の数 N だけ、一次結合係数 $c_i (1 \leq i \leq M)$ に関する線形方程式が得られる。この一群の線形方程式をベクトル形式で書けば、

$$\mathbf{t} = \mathbf{W} \mathbf{c} \quad (9)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{t} &= [t_1, t_2, \dots, t_N]^T, \\ \mathbf{c} &= [c_1, c_2, \dots, c_M]^T, \\ \mathbf{W} &= \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1M} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{N1} & w_{N2} & \cdots & w_{NM} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

である。上式の w_{ji} は上述したように、

$$w_{ji} = (1/\alpha) \int_{S_j} f_i(x, y) ds \quad (11)$$

で定義される。

再記すれば、ガウス形関数 $f_i(x, y)$ の中心座標から伝播経路 S_j に下した垂線の足が経路上にあるか否かで、それぞれ

$$w_{ji} = \frac{\sqrt{2\pi}\sigma}{\alpha} \exp\left(-\frac{p_{ij}^2}{2\sigma^2}\right) \times [\operatorname{erf}(s_1^j) + \operatorname{erf}(s_2^j)] \quad (12) \quad (1 \leq i \leq M-1)$$

あるいは

$$w_{ji} = \frac{\sqrt{2\pi}\sigma}{\alpha} \exp\left(-\frac{p_{ij}^2}{2\sigma^2}\right) \times [\operatorname{erf}(s_{up}^j) - \operatorname{erf}(s_{low}^j)] \quad (13) \quad (1 \leq i \leq M-1)$$

で表わされる。ここに、 s_1^j, s_2^j および s_{up}^j, s_{low}^j は上述したように垂線の足から音響センサまでの距離を表わす。なお、 $w_{jM} = s_d^j/\alpha$ である。

伝播時間 $t_j (1 \leq j \leq N)$ については別途計測できるので、 $\mathbf{t}$ を伝播時間の計測値を並べたベクトルとすれば、(9)式に最小二乗法を適用することにより、

$$\mathbf{c}^* = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{t} \quad (14)$$

なる最適一次結合係数ベクトル $\mathbf{c}^*$ が求まり、これにより (5) 式から温度分布 $T(x, y)$ が求まる。もちろん、本計測が可能となるためには、未知パラメータ数 M は伝播経路の総数 N を超えてはならず、基底関数の数 M は用いる音響センサの数に依存することになる。

ここでは、議論の簡潔さのため、2次元平面内での温度分布計測を考えたが、本方式はもちろん3次元の温度分

布計測にも拡張できる。このときは、ガウス形基底関数 $\{f_i(x, y, z)\} (1 \leq i \leq M-1)$ としては、測定領域内の正四面体格子状の格子点に中心を配置した3次元ガウス形関数を考えればよい⁶⁾。

最後に、音響センサ間の音の伝播経路であるが、ここでは計測のオンライン化のため、2つの音響センサを結ぶ直線状伝播経路を考えた。もちろん、厳密には、伝播経路はスネルの法則に基づいて求められるべきものであるが、後述の数値例からわかるように、余り複雑でない温度分布に対しては、厳密な伝播経路は直線状伝播経路とほとんど変わらない結果が得られる。また、ボイラ内の温度分布計測は、特に計測のオンライン性が要求される。これらのことから、ここでは伝播経路については厳密に考えることなく、この誤差を伝播時間計測誤差に含ませることにした。

3. 最適センサ配置

多くの音響センサが利用できる場合は、センサ配置はそれほど大きな問題とはならないが、音響センサの数が少ない場合はこの配置が計測精度に与える影響は大きいと考えられる。この観点から、ここでは音響センサの最適配置について検討を行う。

3.1 音響センサの数が比較的多い場合

ここでいう「比較的多い」とは、伝播経路の数を N としたとき、実現するボイラ内温度分布が $M (\leq N)$ 個のガウス形基底関数の一次結合により十分正確に表せるぐらいの数をいう。従って、実現するであろう温度分布が、ボイラに依存して更に複雑な形状をとる可能性がある場合は、音響センサの数を更に増加しなくてはならない。

とにかく、このようにして、ボイラ内温度分布が M 個のガウス形基底関数の一次結合によりほぼ正確に表せる場合を考える。従って、このとき残る課題は、伝播時間計測誤差による温度分布計測への影響である。そのため、ここでは、このときの温度分布計測誤差を最小とする最適センサ配置を議論することとする。なお、このときの最適センサ配置を決定する際の評価関数であるが、ここでは $(\sqrt{T(x, y)})^{-1}$ を最小二乗誤差の意味において最適計測できるものを考える。実際に音波伝播時間を計測する際には、雑音などにより伝播時間に計測誤差が生じる。そのため、温度分布を求める際、(14)式より求める一次結合係数ベクトルに、次のような誤差が生じる。

$$\begin{aligned} \mathbf{c}^* &= (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{t} \\ &= (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T (\mathbf{t}_0 + \mathbf{n}) \\ &= (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{t}_0 + (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{n} \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $\mathbf{t}$ は実際に計測された伝播時間を、また $\mathbf{t}_0$ は真の伝播時間を表わす。また、 $\mathbf{n}$ は雑音ベクトルであり、ここでは平均値ゼロ、共分散が

$$\Sigma = E[\mathbf{n}\mathbf{n}^T] = \begin{bmatrix} V & & O \\ & V & \\ & & \ddots \\ O & & & V \end{bmatrix} \quad (16)$$

とする。つまり、各伝播時間の計測値に、平均値ゼロ、分散 V の互いに無相関の雑音を加わるとしている。したがって、雑音による一次結合係数ベクトルの誤差分を $\tilde{\mathbf{c}}$ とおくと、(15) 式より

$$\tilde{\mathbf{c}} = (W^T W)^{-1} W^T \mathbf{n} \quad (17)$$

となる。したがって、雑音による $(\sqrt{T(x, y)})^{-1}$ の誤差 $\tilde{f}(x, y)$ は

$$\tilde{f}(x, y) = \tilde{c}_1 f_1(x, y) + \cdots + \tilde{c}_M f_M(x, y) \quad (18)$$

となる。この $\tilde{f}(x, y)$ のノルム二乗を計算すると

$$\begin{aligned} \|\tilde{f}(x, y)\|_D^2 &= (\tilde{f}(x, y), \tilde{f}(x, y))_D \\ &= \tilde{\mathbf{c}}^T G(f_1, f_2, \dots, f_M) \tilde{\mathbf{c}} \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 $(\cdot, \cdot)_D$ は領域 D における 2 つの関数の (Hilbert の意味での) 内積を、また $\|\cdot\|_D$ はノルムを表わす。さらに、 $G(\cdot, \cdot, \dots)$ は引数についての Gram 行列を表わす。つまり、

$$\begin{aligned} G(f_1, f_2, \dots, f_M) &= \begin{bmatrix} (f_1, f_1)_D & (f_1, f_2)_D & \cdots & (f_1, f_M)_D \\ (f_2, f_1)_D & (f_2, f_2)_D & \cdots & (f_2, f_M)_D \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (f_M, f_1)_D & (f_M, f_2)_D & \cdots & (f_M, f_M)_D \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

$\tilde{\mathbf{c}}$ は確率量であるから、 $\|\tilde{f}(x, y)\|_D^2$ の期待値を計算すると

$$\begin{aligned} E[\|\tilde{f}(x, y)\|_D^2] &= E[\tilde{\mathbf{c}}^T G \tilde{\mathbf{c}}] \\ &= \text{tr}[GE[\tilde{\mathbf{c}}\tilde{\mathbf{c}}^T]] \\ &= V \times \text{tr}[G(W^T W)^{-1}] \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 $E[\cdot]$ は期待値記号であり、 $\text{tr}[\cdot]$ はトレースを表わす。また、 G は $G(f_1, f_2, \dots, f_M)$ の意で用いた。

この誤差ノルム二乗平均を最小にするセンサ配置を最適センサ配置とするのが合理的であり、ここでは (21) 式を最適センサ配置決定のための評価関数とする。従って、(21) 式を最小化するセンサ配置を行えば、温度分布計測を行う際の雑音の影響を小さくできる。なお、ボイラの構造上、音響センサを最適な位置に配置できない場合も考えられるが、このような場合は、許容範囲内で (21) 式を最小化するセンサ配置を考えればよい。

後述の数値例で示すように、温度が $1,000^\circ\text{C}$ から $1,500^\circ\text{C}$ にかけて分布しているような場合を念頭におき、いま $(\sqrt{T(x, y)})^{-1}$ を $1,300^\circ\text{C}$ の近くで 1 次の項まで Taylor 展開すれば Fig.4 のようになり、 $(\sqrt{T(x, y)})^{-1}$ は温度 $T(x, y)$ の線形関数で近似できる。よって $(\sqrt{T(x, y)})^{-1}$ について二乗誤差を最小にする上述の最適センサ配置は、 $T(x, y)$ につい

Fig. 4 Approximation by a linear function

ての二乗誤差をほぼ最小化するものにもなっていることがわかる。

3.2 音響センサの数が少ない場合

前節では、音響センサが比較的多い場合を考えたが、今度は利用できる音響センサが少ない場合を考えてみる。このときは、必然的に基底関数の数を少なくせねばならず、結果として、与えられた基底関数では (実現するであろう) 温度分布は正確には表せないことになる。この場合は、伝播時間に加わる計測誤差 (雑音) による温度分布の計測誤差低減化というよりは、モデル化不備による計測誤差をいかに小さくするかが重要となる。

このためには、具体的には以下のアプローチが考えられる。つまり、いま温度分布が M 個の基底関数 $\{f_i(x, y)\}$ の一次結合として、

$$(\sqrt{T(x, y)})^{-1} = \sum_{i=1}^M c_i f_i(x, y), \quad \mathbf{c} \in \Omega \quad (22)$$

で表わされるとしよう。ここに Ω は、一次結合係数ベクトル $\mathbf{c}$ のとり得る値の集合である。このとき、使用できる音響センサの数によって制約された L 個の基底関数 $\{g_i(x, y)\} (1 \leq i \leq L)$ だけを用いて温度分布を計測しなければならないとしよう。もちろん、 $\{g_i(x, y)\} (1 \leq i \leq L)$ はこのときの温度分布ができるだけ正確に表わせるガウス形関数を考える。もちろん、 $\{f_i(x, y)\}$ とは中心だけでなく分散も異なる。このとき、この新たな基底関数 $\{g_i(x, y)\}$ に対し、提案方式により求めた温度分布を

$$(\sqrt{T^\#(x, y)})^{-1} = \sum_{j=1}^L d_j g_j(x, y) \quad (23)$$

とすれば、

$$\begin{aligned} \text{Max}_{\mathbf{c} \in \Omega} \left\| (\sqrt{T(x, y)})^{-1} - (\sqrt{T^\#(x, y)})^{-1} \right\|_D^2 \\ = \text{Max}_{\mathbf{c} \in \Omega} \left\| \sum_{i=1}^M c_i f_i(x, y) - \sum_{j=1}^L d_j g_j(x, y) \right\|_D^2 \end{aligned} \quad (24)$$

あるいは

$$\text{Max}_{\mathbf{c} \in \Omega} \left\| T(x, y) - T^\#(x, y) \right\|_D^2$$

$$= \max_{\mathbf{c} \in \Omega} \left\| \left(\sum_{i=1}^M c_i f_i(x, y) \right)^{-2} - \left(\sum_{j=1}^L d_j g_j(x, y) \right)^{-2} \right\|_D^2 \quad (25)$$

を最小化するセンサ配置を考えれば、高精度な温度分布計測はあきらめざるを得ないものの、それほど劣化した温度分布計測をすることは防げる。もちろん、(24), (25) 式の $\{d_j\}$ は、 $(\sqrt{T(x, y)})^{-1}$ を $\sum_{i=1}^M c_i f_i(x, y)$ としたときの伝播時間ベクトルを $\mathbf{t}$ として、 W を基底関数 $\{g_j(x, y)\}$ に対して再定義したときの (14) 式により求まる一次結合係数である。

4. シミュレーションおよび検討

提案手法の有効性を検証するため、温度分布計測および最適センサ配置についてシミュレーションを行った。

4.1 温度分布計測

まず、温度分布計測を考える。このため、Fig.5 に示すように、ボイラの側壁に6個の音響センサを配置する。なお、ボイラの大きさは、縦、横、それぞれ10(m), 8(m)とする。音響センサの設置箇所であるが、最初、長さが短い側壁の方は、それぞれ中央に1つずつ、長手の側壁の方については、それぞれ側壁長を3等分する位置に配置しようとしたが、従来法を用いる際、領域を全て同じ大きさの直方形セルに分割すると、音波伝播経路が領域を分割する境界線と重なるため、温度分布計測ができない。したがって、ここでは3等分点から少し移動し、側壁の長さの比が3:4:3になる位置に配置した。これにより、音波伝播経路は13通り生ずる。

実際に音波伝播時間を計測する際には、伝播時間に誤差が加わるので、そのことを考慮に入れ、ここでは、伝播時間の計算値に平均値がゼロ、標準偏差 5.0×10^{-5} の独立なガウス雑音を加えた。なお、伝播時間に $\sqrt{2} \times 5.0 \times 10^{-5}$ の大きさの雑音を加えると、1,500°C 付近で音波が10m 伝播する際、温度にして20°C 程度の誤差が生じることとなる。

このとき、測定領域を直方形セルに分割し、[このセル内の温度は一定であるとする従来法]と提案手法の2つの手法により、それぞれ温度分布を計測してみた。なお、従来法による領域のセル分割に際しては、Fig.7 に示すように、全て同じ大きさの長方形になるようにし、その分割数は9個とした。つまり、長い方と短い方の側壁長をそれぞれ3等分した均一セルを考えた。これに対し提案手法では、領域内に格子間距離 $r = 3$ の正三角格子を考え、この格子点に中心をもつ10個のガウス形関数を考えた。これらの中心の座標はFig.5 に示すように、原点に最近接した中心を表わす位置ベクトル $\mathbf{a}_0 = (2, 4 - 3\sqrt{3}/2)^T$ に、それぞれ x 軸、 y 軸方向のシフトベクトル $\mathbf{a}_x = (3, 0)^T$ 、 $\mathbf{a}_y = (1.5, 3\sqrt{3}/2)^T$ を整数倍して加えることにより与えられる。つまり、 l, m を整数として $\mathbf{a}_0 + l\mathbf{a}_x + m\mathbf{a}_y$ で表わされる点集合である。両方式に対し手法の有効性を比較検討するため、ここではほとんど同数の未知パラメータを考えたわけである。

なお、測定対象となる温度分布 $T(x, y)$ は、本論文で考えた基底関数とは中心、分散が全く異なる2つのガウス形関数に

Fig. 5 Location of acoustic sensors

Fig. 6 Temperature distribution

バイアスを加えたものにより作成した。つまり、

$$T(x, y) = 300 \times \exp\left[-\frac{(x-1)^2 + (y-4)^2}{2 \times (15)^2}\right] + 500 \times \exp\left[-\frac{(x-6)^2 + (y-4)^2}{2 \times (3)^2}\right] + 900 \quad (26)$$

このとき、両方式による計測精度を評価するため、雑音系列を100回変えたときの測定領域内の温度誤差のノルムの平均値をとった。その結果、従来法では温度誤差のノルムの平均値が83.3°C となったのに対し、提案手法では24.9°C となり、計測精度が格段に向上していることがわかる。参考のため、ある雑音系列の下で温度分布計測を行ったときの両手法による計測結果を等高線でそれぞれFig.7, 8 に示す。また、Fig.9 に $y = 4$ での温度分布を示す。図より、従来法では隣り合うセル間で温度が急激に変化するため計測精度は極めて悪いが、提案手法では滑らかな温度分布計測のみならず高精度な計測が実現していることがわかる。

ここでは、1つの温度分布に対して提案手法の有効性を示したが、他の様々な温度分布についても同様の結果が得られている。

参考のため、Fig.10 に示す2峰性の温度分布に対し提案方式と従来方式を適用したときの温度分布計測結果をそれぞれFig.11, Fig.12 に示す。また、Fig.9 と同様、両方式の比較の

Fig. 7 Measured distribution by a conventional method

Fig. 8 Measured distribution by the proposed method

Fig. 9 Temperature distribution at $y = 4$

ため、 $y = 4$ における温度分布計測結果も Fig.13 に示す。これらの図より、提案方式は単峰性のみでなく、2 峰性の場合も有効であることがわかる。もちろん、同じようにして、(音響センサの数を増加すれば)3 峰性以上の多峰性の場合も有効である。しかしながら、工業用ボイラの構造上、それほど多くの峰をもつ温度分布を考える必要はないと思われる²⁾。

ところで、Fig.6 の温度分布に対して、Fig.5 における#2 と #5、#2 と #4、#3 と #4 の音響センサ間の厳密な伝播経路を(スネルの法則に基づいて)求めてみると、それぞれ直線状伝播経路との最大の食い違いは、(直線状伝播経路距離に対し)距離にしてわずか 1.54%、2.42%、1.42%であり、かつ、

Fig. 10 Temperature distribution

Fig. 11 Measured distribution by a conventional method

Fig. 12 Measured distribution by the proposed method

このときの伝播時間はそれぞれ 0.007%、0.362%、0.015%ずつしか変わらない。これらのことから、温度分布が余り複雑でなければ、この伝播経路の違いによる伝播時間の差を伝播時間計測誤差に含ませることができることがわかる。なぜなら、シミュレーションで用いた伝播時間計測誤差の標準偏差 5.0×10^{-5} は、たとえば上記の3つの伝播経路に対しては、伝播時間にして 0.437%、0.465%、0.717%の値をもつからである($\sqrt{2}$ 倍の誤差を考えればもっと大きくなる)。

ところで、Fig.6 の温度分布に対し、試みに $T(x, y)$ と $1/\sqrt{T(x, y)}$ を、それぞれシミュレーションで用いた同一のガウス形基底関数で近似したときの相対誤差率(実効値で

Fig. 13 Temperature distribution at $y = 4$

評価) を求めると、それぞれ 1.02%, 0.19% となり、前述したように、 $T(x, y)$ より $1/\sqrt{T(x, y)}$ の方が却ってガウス形基底関数の一次結合により正確に表現でき、(5) 式のモデル化の有効性が示される。以上のことは、詳細は略すが、Fig. 6 の単峰性温度分布だけでなく、Fig. 10 の 2 峰性温度分布の場合にも同様である。

4.2 最適センサ配置

4.2.1 音響センサの数が比較的多い場合

前節で用いた $10(\text{m}) \times 8(\text{m})$ のサイズのボイラで、長い方の側壁に 2 個ずつ、短い方の側壁に 1 個ずつの計 6 個のセンサを設置する場合の最適センサ配置を考えてみる。なお、温度分布計測に使用する基底関数は前節と同じものとした。

このとき、(21) 式の評価関数を最小にするセンサ配置を Fig. 14 に示すが、この配置は Fig. 15 に示す [長い方の側壁長を 3 等分、短い方の側壁長を 2 等分した位置のセンサ配置] とは全く異なる。つまり、常識的に最適と考えられるセンサ配置と異なることがわかった。参考のため、最適センサ配置が得られたときの評価値は 3.45V、Fig. 15 のセンサ配置に対する評価値は 12.2V となった。ここに、V は伝播時間に加えた雑音の分散である ((21) 式参照)。

参考のため、前章のシミュレーションで用いた温度分布に対し、この 2 つのセンサ配置によりそれぞれ温度分布計測のシミュレーションを行ってみた。なお、伝播時間に加える雑音の大きさについては、前章のシミュレーションと同じにし、また雑音系列を 100 回変えた。このとき、Fig. 15 のセンサ配置では温度誤差のノルムの平均値が 28.7°C となったのに対し、最適センサ配置では 19.0°C となり、直接的な温度分布計測誤差評価を行っても、最適センサ配置の方が格段に優れていることがわかる。

参考のため、両センサ配置に対し、ある雑音系列の下での温度分布計測を行ったときの計測結果を Fig. 16, 17 に示す。Fig. 15 のセンサ配置では温度分布計測に伝播時間の計測誤差の影響が大きく現れているのに対し、最適センサ配置では影響が軽減化されていることがわかる。

Fig. 14 Optimal sensor location

Fig. 15 Non-optimal sensor location

Fig. 16 Measured distribution by the optimal sensor location

Fig. 17 Measured distribution by the non-optimal sensor location

Fig. 18 Temperature distribution A

Fig. 19 Temperature distribution B

Fig. 20 Optimal sensor location

4.2.2 音響センサの数が少ない場合

次に、前節と同じサイズのボイラで、4つの側壁にそれぞれ1個ずつ計4個のセンサを設置する場合の最適センサ配置を考えてみる。なお、温度分布計測に使用する基底関数としては、領域内に格子間距離 $r=3$ の正三角格子を考え、この格子点に中心をもつ4個のガウス形関数を考えた。これらの中心の座標は、(2.4, 4), (5, 2.5), (5, 5.5), (7.6, 4)である。いま簡単のため、ボイラ内の温度分布がFig.18, 19に示す2つのパターンA, Bでほぼ表わされるとしよう。

このとき、全てのセンサの位置を変数とし、この2種類の代表的な温度分布をとり得るボイラ内温度分布計測に対し、本論文の方法により最適センサ配置を求めてみよう。その結果、Fig.20に示すセンサ配置が最適となった。このときの各温度分布に対する計測誤差のノルムは、温度分布Aでは26.8[度]、

温度分布Bでは11.9[度]となった。

この最適センサ配置の有効性を示すため、各側壁の中央にセンサをそれぞれ1個ずつ配置した(常識的に望ましいと思われる)センサ配置に対しても、温度分布計測誤差のノルムを求めてみた。その結果、温度分布A, Bに対しては誤差ノルムはそれぞれ34.4[度], 13.9[度]となり、提案方式による $\text{Max}\{26.8, 11.9\} = 26.8$ は、他の方式による $\text{Max}\{34.4, 13.9\} = 34.4$ に比べかなり小さくなっていることがわかる。

本論文では、焦点を温度分布計測に当てたため、特に伝播経路上での音波伝播時間の計測についてはふれなかったが、これについては今田、深川²⁾の方法による以外に、筆者らが開発した方法⁴⁾も考えられる。つまり、送受波器の物理特性を考慮し、受波器に受信される音波信号の予測波形を事前に作成し、これと受波信号とのパターンマッチングにより音波の受波時刻を正確に検出する方法である⁴⁾。この方法によれば、送波器と受波器を5mの距離に設置し、入力電気信号を1kHz、波数が3の正弦波(サンプリング周波数を20kHz)としたときの実験では、大気室内で室温9.0°Cに対し10.0°Cの計測結果を得ている。これを、温度が1,500°C付近、音響センサ間の距離が10mのボイラに置き換えれば、7.5°Cの誤差に相当する。よって、この音波伝播時間計測法は望ましいものと思われ、近い将来、本システムと本論文で提案の温度分布計測法を融合したボイラ内温度分布計測システムの具体的な構築が望まれる。

5. 結 言

本論文では、ボイラの側壁に設置した音響センサ間の音の伝播時間を計測することにより、ボイラの温度分布を計測することを理論的に考えたが、その際、ボイラ内の温度分布が滑らかに、かつ高精度に計測できるよう、複数のガウス形関数を一次結合したものにバイアス分を加えることにより温度分布を表わす方式を提案した。さらに、音の伝播時間計測誤差の影響を低減化する音響センサの最適センサ配置、および音響センサがわずかししか使えないときの最適センサ配置についても検討を加えた。

本論文では、一部シミュレーションにより、また一部実験により提案方式の有効性を示したが、今後、企業との共同研究、実証研究などを通して提案方式の工学的有効性を確認していきたい。

参 考 文 献

- 1) 伊藤、坂井：ボイラ燃焼の音波計測とをのイメージ処理技術に関する基礎研究、日本機械学会論文集、B-53-439, 1610/1614(1987)
- 2) 今田、深山：音波を利用したボイラ炉内の温度分布計測、計測技術'96.5, A01-04, (1996)
- 3) 藤村 貞夫：温度計測技術の動向、計測と制御、35-2, 364/373(1993)
- 4) 田中、廣澤：音響センサを用いたボイラ内温度計測、第37回SICE学術講演会予稿集、109A-5, 173/174(1998)
- 5) 田中正吾：「知能化計測の基礎と応用」、アイビーシー出版(1997)

- 6) 大込純治：音響センサを用いたボイラ内温度分布計測，山口大学工学部卒業論文(1999)

~~~~~

[著 者 紹 介]

田 中 正 吾 (正会員)

1976 年九州大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年同大学助手を経て，80 年山口大学工学部電気電子工学科助教授。91 年同大学電気電子工学科教授，現在に至る。インテリジェント計測，異常診断などの理論および応用研究に従事(工学博士)。電気学会，システム制御情報学会などの会員。

廣 澤 聡 (学生会員)

1997 年山口大学工学部電気電子工学科卒業。99 年，同大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程修了。現在，山口日本電気株式会社勤務。在学中は音響センサを用いた温度分布計測に関する研究に従事。

佐 伯 正 裕 (学生会員)

1998 年山口大学工学部電気電子工学科卒業。現在，同大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程在学。音響センサを用いた温度分布計測に関する研究に従事。

~~~~~