音響管粉粒体レベルスイッチ

吉田 智哉*・小林 一行*・鈴木 郁*
山下 浩二**・渡邊 嘉二郎*

Acoustic Tube Level Switch for Particles

Tomoya YOSHIDA*, Kazuyuki KOBAYASHI*, Kaoru SUZUKI*,
Koji YAMASHITA** and Kajiro WATANABE*

This paper describes a new type of level switch which detects the existence of light, hot particulates such as ash in a tank. Here we employed an acoustic tube method. A port of the tube was driven by a piezo-sounder at less than its resonance frequency and the length L of the tube was selected to have the same resonance frequency, i.e., $L = n \times (\text{half of the wave length})$. If the other port is covered by particulates, the acoustic impedance at the resonance frequency increases, which yields increases of the electric impedance of the piezo device. The sound velocity increases in proportion to the temperature, which may deteriorate the optimal measurement condition, i.e., the length of tube is not optimal at the altered temperature. However theoretical studies showed that covering a detected port by particulates mostly influenced the acoustic viscosity which is less influenced by the temperature change. As a result of theoretical studies, we showed that the proposed method can work in a certain temperature range. We verified the theoretical results using experiments which showed that the proposed method worked in the temperature range from 5°C to 80°C with a piezo sounder with 760 resonance frequency and an acoustic tube with half the wave length. Moreover, it detected particles with low bulk density such as those with 13 kg/m³. We also conducted an experiment to judge the existence of gravel heated to 450°C in at a room temperature of 23°C which was successful.

Key Words: particulate level switch, acoustic tube, low bulk density material, high temperature material

1. はじめに

レベル計は、気体と液体、液体相互間、気体または液体と粉粒体などの境界面を測定する工場計器である。レベル計には境界面位を連続的に測定する連続型と、境界面位がある値に達したか否か判定するスイッチ型がある。連続型は、その測定技術の困難さにもかかわらずモニタ用途が多いのに対し、比較的容易に思えるスイッチ型はプラントシーケンス条件制御のセンサとして使われることが多い¹⁾。そのためレベルスイッチには高い信頼性と確実性が求められる。液面レベル計は比較的容易に実現できる。たとえば、密度 ρ の液体が重力加速度 g のもとレベル h で容器内に収納されているとき、容器底面圧力と容器上部の差圧 p より、レベルは $h = p/\rho g$ で測定できる。液体レベル計の一方式として、ワイヤ付きのマ

イクロウエーブルレベル計²⁾、タンクの姿勢にかかわらずレベルを測定する空気圧方式^{3),4)}、同じ目的で複数の電極を用いた静電容量型レベル計⁵⁾などの研究がなされている。最近、光ファイバーで気体と液体の境界面での反射からレベルを測定する方法⁶⁾などの研究が取り組まれている。

これに対して、粉粒体のレベル計は、そのかさ密度は空気の密度より少し高い物から高密度の岩石などまで、また粒子径もナノメートルからセンチメートルまでと多様であり、温度も常温から燃焼器から排出されたアッシュなどのような高温体までを対象としている。粉塵の付着も覚悟しておかなければならない。そのため、一つの測定原理でこれらをカバーしきれず、機械的な重量式、回転式、振動片式、電気的な導電率式、静電容量式および波や放射を用いる超音波、マイクロウェーブ、放射線式など多様である¹⁾。多様な粉粒体に適用できるレベル計は、その重要性にもかかわらず、ほとんど研究に取り組まれていない。本論文では従来の方法では検知できない程度の低いかさ密度や比誘電率、および低温から高温の粉粒体に対応できるレベルスイッチを提案する。これはパイプ内を伝播する音響現象を利用する方式である。高温の粉粒体には超音波や電磁波で非接触な方法が望ましいが、実際には低いかさ密度や比誘電率が1に近い粉粒体の場合には

* 法政大学大学院理工学研究科 小金井市梶野町 3-7-2

** 関西オートメーション(株) 東京都港区浜松町 1-29-6

* Faculty of Science and Engineering, Hosei University, 3-7-2 Kajino-cho, Koganei

** KANSAI Automation Co., Ltd., 1-29-6 Hamamatsu-cho, Minato-ku, Tokyo

(Received April 25, 2017)

(Revised July 18, 2017)

Fig. 1 Acoustic tube level switch for particulates

対象物からの反射は小さく、環境構造物からの反射がほとんどである。

音響管を用いた理由はこの問題を解決するためである。筆者らは、かつてある周波数で共鳴する音響管の開放部を閉塞することで音響インピーダンスが変わるという定性的な理解から音響管を用いる方法を実験的に検証し提案した^{7), 8)}。しかし、低いかさ密度からの検知を優先させたため、環境温度変化に敏感で、狭い温度範囲でしか安定に動作せず安定な温度範囲についての定量的な検討はしていなかった。

本論文では、この問題を音響温度特性として理論的に解明し、比較的に広い温度範囲で安定に動作する条件と、極端な温度変化の場合で温度による状況が著しくなったときにはスイッチ動作による判断を単なる固定閾値処理ではなく動的閾値処理で対処する方式を提案する。

一定周波数の圧電サウンダで一定長の音響管を用いる最も単純化された音響管レベルスイッチについてはつぎのような設計指針が考えられる。

- (i) 一定周波数圧電サウンダと一定長音響管を用いる場合、温度変化に対して、よりロバストにするためには、共振周波数の低いサウンダを選び、音響管長さが半波長で、タンク内の温度が高くても十分放熱できるようにする。
- (ii) 可変周波数圧電サウンダとある温度での波長 λ で決めた $L = n\lambda/2$ の一定長の音響管を用いる場合、温度センサで管内代表点の温度 T を計測し、周波数 $f = n \cdot (331.5 \text{ m/s} + 0.6T)/2L$ としてサウンダ周波数を温度に適応させる。

実験によりその実現可能性を確認し本方式の設計指針を明らかにする。

2. 粉粒体用の音響管レベルスイッチ

2.1 音響管レベルスイッチ

Fig. 1 に上記の設計指針にもとづいて設計された粉粒体用の音響管レベルスイッチを示す。この要素および機能はつぎのとおりである。検出すべきレベルの位置に検出口を設けた①タンクに等断面積の②音響管を挿入しこの共振周波数で、③圧電サウンダを駆動する。検出端が粉粒体に覆われたことで変化する音響インピーダンスを圧電サウンダの電氣的インピーダンス変化としてとらえ、④分圧回路で電圧変換し⑤マイクロプロセッサに入力し、Fig. 1 のアルゴリズムに基づきスイッチ動作による判断を行なう。音響管の長さは圧電サウンダ共振周波数と計測環境内の平均温度から定まる波長の半波長の整数倍とし一定の長さとする。⑥防塵フィルタの脱着部は $1/4$ 波長の奇数倍の場所に設置する。この部分は容易に管が脱着できるようにし、その場所にフィルタを設置する。これにより必要に応じてフィルタは容易に交換できる。圧電サウンダと音響管が最も共振する環境温度で駆動した場合、この方式は最適に機能する。環境温度、タンク内収納物の温度変化に伴い音響管内部温度は変化し最適条件が崩れる。このような状況でも、ある温度範囲で固定閾値によりスイッチ動作を行なうことができる。環境温度が急変しない条件下で、動的閾値判定によりさらに広い温度範囲で対応できる。Fig. 1 に示したアルゴリズムは、動的閾値設定を含むものである。

提案する方法の運用条件を以下のように限定し、どの範囲の温度変化においてこの方法が適正に動作するかを確認する。

- (C1) 音響管の検出端と音響駆動端の温度差は最大 100°C 程度であり音響管長さ方向に線形に温度は分布し、かつ環境温度は $\pm 50^\circ\text{C}$ 程度の範囲で変化する。

(C2) タンク内の粉粒体は音響的には音響粘性で与えられ、粉粒体のかさ密度の値が小さく空気が粉粒体を通過できる断面積は音響管の断面積に比して少し小さい程度である。

条件 (C1) は高温のアッシュなどが対象の場合である。アッシュ自体が数百度でもタンク外では音響管により放熱される。さらに音響管に放熱フィンを付加すると管内はほぼ環境温度に近くなり、容易に満たされる条件である。音響管の長さ方向の温度分布プロフィールは多様でここでは代表的に線形分布とした。条件 (C2) については、粘性抵抗は (空気密度) $\times$ (音速)/(音響管断面積より少し小さい断面積) で与えられ、たとえば直径 1 cm の音響管の場合で常温のときの音響抵抗は 12.4×10^5 Pa/m/s. すなわち 12.4 音響 Ω オーダーである。

2.2 音響管レベルスイッチ構成要素の定数と変数

Fig. 1 に示したレベルスイッチに関する定数・変数を以下のように定義する。

t	: 時間 [s]
s	: 複素角周波数 [rad/s]
ω	: 音の角周波数 [rad/s]
f	: 音の周波数 ($= \omega/2\pi$) [Hz]
x	: 音響管内で駆動端からの位置 [m]

<設置環境および対象粉粒体>

P	: 大気圧 [atm]
$T(x)$	: 音響管の x における空気の温度 [$^{\circ}\text{C}$]
T_0	: 音響管がおかれる環境温度 [$^{\circ}\text{C}$]
T_H	: 検出端における温度 [$^{\circ}\text{C}$]
τ	: T_0 からの温度変化 [$^{\circ}\text{C}$]
$\rho(T)$	: 空気の密度 [kg/m^3]
$C(T)$	: 音速 [m/s]
$\lambda(T)$	: 音の波長 [m]
A_p	: 粉粒体の空気通過断面積 [m^2]
R_a	: 粉粒体の粘性抵抗 [$\text{Pa}/\text{m}^3/\text{s}$]
d_a	: 粉粒体の機械的粘性係数 [$\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$]

<圧電サウンダ>

m	: サウンダ内の空気と圧電振動子の合成質量 [kg]
k	: サウンダ内の空気と圧電振動子の合成バネ定数 [N/m]
D	: 機械的減衰係数 [N/m/s]
d	: 電極間の厚さ [m]
C	: 静電容量 [F]
Q	: 永久電荷 [C]
$Z_e(i\omega)$	: 角周波数 ω における電氣的インピーダンス [Ω]

<音響管>

R	: 音響管半径 [m]
A	: 断面積 ($= \pi R^2$) [m^2]
L	: 音響管長であり、音の半波長の整数倍 [m]
$Z_a(i\omega)$	: 角周波数 ω における音響インピーダンス [$\text{Pa}/\text{m}^3/\text{s}$]
$p(x, t)$	: 位置 x における音圧 [Pa]

$u(x, t)$	: 位置 x における体積速度 [m^3/s]
$p(0, t)$	: 位置 $x = 0$ における音圧 [Pa]
$u(0, t)$	: 位置 $x = 0$ における体積速度 [m^3/s]
$P(x, i\omega)$	: 位置 x , 角周波数 ω における音圧 [Pa]
$U(x, i\omega)$	: 位置 x , 角周波数 ω における体積速度 [m^3/s]

<分圧回路>

r	: 出力電圧分圧抵抗 [Ω]
$e(t)$	: 出力電圧 [V]

<判断ロジック>

e_t	: 判断閾値 [V]
t_j	: 判断時間 [s]
ε	: 閾値余裕 [V]

2.3 音響管インピーダンス

条件 C1, C2 のもとで Fig. 1 の $x = 0$ 側からの音響管の音響インピーダンスは付録に示す理論計算により

$$Z_a(i\omega) = R_a \frac{1 + i \frac{A_p}{A} \tan \theta(\tau)}{1 + i \frac{A}{A_p} \tan \theta(\tau)} \quad (1)$$

となる。

この音響インピーダンス [単位は $\text{Pa}/\text{m}^3/\text{s}$] に A^2 を乗じ時間微分 $i\omega$ を作用させるとこの複素数は複素バネ定数 [単位は N/m] となりつぎのように示される。

$$\begin{aligned} i\omega A^2 Z_a(i\omega) &= i\omega A^2 R_a \frac{1 + i \frac{A_p}{A} \tan \theta(\tau)}{1 + i \frac{A}{A_p} \tan \theta(\tau)} \\ &= \frac{\omega A \rho(T_0) C(T_0) \left(\left(\frac{A}{A_p} \right)^2 - 1 \right)}{1 + \left(\frac{A}{A_p} \tan \theta(\tau) \right)^2} \tan \theta(\tau) \\ &\quad + i \frac{\omega R_a A^2 (1 + \tan^2 \theta(\tau))}{1 + \left(\frac{A}{A_p} \tan \theta(\tau) \right)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

虚数部は常に正の値をもち粘性特性を表わし、実数部は $\tan \theta(\tau)$ により正負の値になり得て、正の場合弾性、負の場合慣性特性を示す。

(1) 式, (2) 式における $\theta(\tau)$ と $\tan \theta(\tau)$ が温度変化 τ によりどれだけ変化するかを例示する。たとえば $n = 1$ で $T_0 = T_H = 50^{\circ}\text{C}$ および $T_0 = 50^{\circ}\text{C}$, $T_H = 100^{\circ}\text{C}$ の場合で温度を $\tau = \pm 50^{\circ}\text{C}$ で変化させる。Fig. 2 上部に $\theta(\tau)/\pi$ のグラフを線形スケールで、下部に $|\tan \theta(\tau)|$ グラフを log スケールで示す。図に示すとおり $\theta(\tau)/\pi$ は 1 近傍の値となり温度の増加に伴い単調減少する。この温度範囲での $|\tan \theta(\tau)|$ は最大で 0.3 程度の値を持っている。

条件 (C2) より $A_p < A$ かつ $A_p \cong A$ であり、また Fig. 2 に示すように音響管の長さを $L = \lambda/2$ とすると $|\tan \theta(\tau)|$ は最大で 0.3 程度である。したがって (2) 式の虚数部の粘性特性項は

$$\frac{\omega R_a A^2 (1 + \tan^2 \theta(\tau))}{1 + \left(\frac{A}{A_p} \tan \theta(\tau) \right)^2} \cong \omega R_a A^2 = \omega \frac{\rho(T_H) C(T_H)}{A_p} A^2 \quad (3)$$

Fig. 2 Temperature characteristics of $\theta(\tau)/\pi$ and $|\tan \theta(\tau)|$

となり機械的粘性係数 d_a はつぎのように近似できる.

$$d_a \cong \frac{\rho(T_H)C(T_H)}{A_p} A^2 \quad (4)$$

付録 (A.12) 式の $\rho(T_H)C(T_H) \cong \rho(T)C(T)$ より, 係数 d_a は温度依存性が少なく粉粒体の空気通過断面積 A_p , すなわちかさ密度の変化に依存する.

同様に (2) 式の実数部の慣性項あるいは復元項 M_i は

$$M_i = \omega d_a \left(\frac{A}{A_p} - \frac{A_p}{A} \right) \tan \theta(\tau) \quad (5)$$

となる. 条件 (C2) と Fig. 2 より $\left(\frac{A}{A_p} - \frac{A_p}{A} \right) \tan \theta(\tau) \cong 0$ であり粘性項 ωd_a に対して M_i は小さい. 以上を整理する.

- 条件 (C1) の温度差および環境温度変化にもかかわらず, ある範囲 (たとえば $\pm 50^\circ\text{C}$) において音響インピーダンスに温度が及ぼす影響は小さい.

- 条件 (C2) を満たす粉粒体の場合, 音響インピーダンスは粘性特性が卓越する. 粘性特性は温度依存性は少なく, したがって音響インピーダンスは温度依存性も少ない.

2.4 圧電サウンダの電気的インピーダンス

圧電サウンダの電気的インピーダンスは圧電素子自体の質量, バネ係数および機械的減衰係数にサウンダキャビティ内の空気質量および空気バネ定数を合わせてその特性が与えられ, 電気的インピーダンスはつぎようになる⁹⁾.

$$Z_e(i\omega) = \frac{-m\omega^2 + k + i\omega D}{i\omega C \left(-m\omega^2 + k + \frac{1}{2C} \left(\frac{Q}{d} \right)^2 + i\omega D \right)} \quad (6)$$

この圧電サウンダに Fig. 1 に示すような音響管を接続する. 2.2 節で述べた音響管の特性は粘性項が主要で (4) 式の機械的粘性係数 $d_a = \frac{\rho(T_H)C(T_H)}{A_p} A^2$ のダンパーが付け加えられ, インピーダンスは

$$\begin{aligned} Z_e(i\omega) &= \frac{-m\omega^2 + k + i\omega \left(D + \frac{\rho(T_H)C(T_H)}{A_p} A^2 \right)}{i\omega C \left(-m\omega^2 + k + \frac{1}{2C} \left(\frac{Q}{d} \right)^2 + i\omega \left(D + \frac{\rho(T_H)C(T_H)}{A_p} A^2 \right) \right)} \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 3 Change in impedance of the piezo device with respect to the change in the acoustic impedance

Fig. 4 Experimental set-up to measure the impedance of a sounder connected with an acoustic tube

となる. (6) 式と (7) 式より共振周波数 f_r と逆共振周波数 f_{ar} は圧電サウンダ単体の場合と音響管接続の場合で減衰項による影響でわずかなには変わるがほぼつぎようになる.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k + \frac{1}{2C} \left(\frac{Q}{d} \right)^2}{m}} \quad (8)$$

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

共振周波数における減衰係数 ζ は

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{D + \frac{\rho(T_H)C(T_H)}{A_p} A^2}{\sqrt{m \cdot \left(k + \frac{1}{2C} \left(\frac{Q}{d} \right)^2 \right)}} \quad (10)$$

となり, A_p の減少, すなわち粉粒体かさ密度の値の大きさに比例し減衰係数は増加する. 開放の場合, $A_p \rightarrow A$ と大きくなり ζ は減少し共振しやすくインピーダンスは大きくなる. 逆に閉塞では, ζ は大きくなり共振し難くなる. Fig. 3 に理論的に考えられる共振と逆共振周波数近傍の圧電サウンダの電気的インピーダンスの周波数特性の概要を示す.

3. 実験による検証

3.1 基礎実験

3.1.1 理論モデルの検証

上述した理論展開から求まる音響管接続圧電サウンダの電気的インピーダンスの温度特性を実験的に調べる.

Fig. 4 の左端の圧電サウンダ (Murata PKM44EW) の共振周波数は仕様では 1 kHz であるが, 実際は 760 Hz 近傍で共振する. 音響管半径は $R = 7.0 \text{ mm}$, 長さは 16°C の環境でサウンダ全体として共振している周波数 760 Hz の音波の半波長から開口端補正分を差し引き, $L = 0.2244 - 0.6 \times 0.007 \text{ m} = 0.22 \text{ m}$ とした. 圧電サウンダ側は開口端がないのでその補正

Fig. 5 Frequency response of impedances when the detecting point terminal is opened or closed using cotton with bulk density 36 kg/m^3 for temperatures ranging between 5°C to 80°C

はない。音響管の周囲は水が収納できる横置きタンクで覆われている。この容器に 80°C の温水を入れ自然放熱により温度が室温近くまで下がったら氷を加え 5°C まで下げたときの、圧電サウダのインピーダンスの周波数特性を求めた。計測機器としてスペクトルアナライザ (Digilent 社 410-321) を用いた。周波数特性は Fig. 1 の分圧回路のように圧電サウダに $1 \text{ k}\Omega$ の抵抗を直列に接続しその端子間電圧から電流を求め、その電流で圧電サウダの端子電圧を割ることで求めた。周波数範囲は逆共振と共振周波数を含む $500 \text{ Hz} \sim 1 \text{ kHz}$ にした。閉塞状態はかさ密度 36 kg/m^3 の脱脂綿で検出端を覆った。Fig. 5 に温度が 5°C 、 30°C 、 55°C および 80°C の場合の開放状態と閉塞状態の周波数特性を示す。開放状態では温度の違いによらず周波数 760 Hz 近傍でインピーダンスは極大となる。極大インピーダンスは 30°C と 55°C の常温に比して 5°C の低温、 80°C の高温では小さめになっている。同じ周波数で閉塞時インピーダンスは温度の違いによらずほぼ一定である。共振周波数近傍でのインピーダンスは開放時のほうが閉塞時より大きい。逆共振周波数近傍では開放時のほうが閉塞時より小さくなる。Fig. 6 に各温度において、開放時のインピーダンスが閉塞時より大きくなる周波数の範囲と共振周波数を示す。

Fig. 6 より $5 \sim 80^\circ\text{C}$ の範囲において、開放時のインピーダンスが閉塞時より大きくなる下限周波数の最大値は 741 Hz 、上限周波数の最小値は 877 Hz である。一方で、共振周波数は平均値 758 Hz 、標準偏差 4 Hz とほぼ一定している。

Fig. 7 に開放時共振周波数の平均である 758 Hz で検出端を開放した場合と閉塞した場合のインピーダンスおよび圧電サウダ分圧回路端子電圧を示す。 $5 \sim 80^\circ\text{C}$ の温度範囲で閉塞時インピーダンスはほぼ一定であるが開放時インピーダンスは常温では大きく低温と高温では小さくなる。分圧回路電圧レベルもインピーダンスと逆特性になるが、温度変化に対して同じような特性を示す。結果として温度変化に対し電圧レ

Fig. 6 Frequency range when the open resonance impedance is greater than the closed impedance and the resonance frequency for temperatures ranging between 5°C to 80°C

(a) Temperature vs. Impedance

(b) Temperature vs. output Voltage

Fig. 7 Open and closed resonance impedances for temperatures ranging between 5°C to 80°C

ベルの差は、高温や低温において小さくなる。しかし温度変化の影響があるにもかかわらず、 $5 \sim 80^\circ\text{C}$ ではたとえば 2.15 V の固定閾値でも開閉は判定できる。

3.1.2 かさ密度と出力電圧

Fig. 8 に温度が 25°C の環境でかさ密度に対する出力電圧を示す。かさ密度 0 は開放状態を示す。開放状態では 1.8 V が出力される。かさ密度 13 kg/m^3 では 1.85 V であり検出可能である。

20 kg/m^3 程度よりかさ密度が小さい粉体では、検出のための電圧差のマージンが 10% 以下と少ないが、測定のばらつきが小さければ検出可能であると考えられる。

3.1.3 音響管の 1/4 波長の場所に入れた防塵フィルタの効果

長さ $L = 0.22 \text{ m}$ の音響管の駆動端から 0.11 m を中心に、防塵フィルタをいれた。フィルタには塵埃が付着する。その

Fig. 8 Bulk density vs. output voltage

(a) Thickness of cotton as dust

(b) Thickness of dust vs. output Voltage

Fig. 9 Effect of the thickness of the dust attached to the dust filter

影響を調べる。かさ密度 36 kg/m^3 の脱脂綿を塵埃の代わりとして挿入した。Fig. 9 に示す塵埃の厚さで、検出端開放、かさ密度 36 kg/m^3 の脱脂綿で粉粒体の代わりとして覆った場合、密閉の場合での出力電圧を、 23°C の環境で測定した。防塵フィルタに付着する粉塵の厚さに応じて検出端開放でも出力電圧が上がり、かさ密度 36 kg/m^3 で厚さが 26.5 mm 程度の粉塵の詰まりがあっても粉粒体代わりの脱脂綿の存在の有無は判別できる。また温度一定の条件で検出端が開放のときの出力電圧レベルから、粉塵の厚さが推定でき、フィルタ交換情報を発生できる。粉塵が蓄積する周期をあらかじめ知っていれば、それより十分短い周期で、開放状態の校正を行なうことで対処できる。

3.1.4 動作動的閾値アルゴリズムの検証

動的閾値の検証実験を行なう。Fig. 1 に示すレベルスイッチで 3.1.1 項の実験装置と同じ条件で実験を行なった。動的閾値の判断のパラメータ；初期 $e_t = 2.2 \text{ V}$, $t_j = 10 \text{ s}$, $\varepsilon = 0.2 \text{ V}$ および A/D 変換サンプリング間隔 1 ms でスイッチ動作を行なった。Fig. 10 に分圧回路電圧、温度変化およびスイッチ動作のようすを示す。はじめ Fig. 4 に示す音響環境温度を定める容器に 80°C の温水を加え温度を上昇させ、自然放熱で温度を下げ、常温近くになったとき氷を加えて温度変化を与えた。この間の 8000 s の間にかさ密度 36 kg/m^3 の脱脂綿で 8 回各 30 s の閉塞を行なった。ゆっくりした温度変化に伴い開放状態と閉塞状態の出力電圧がドリフトする。Fig. 10 の点線は開放状態から閉塞状態、または閉塞状態から開放状態に

(a) Level switching with changing temperature

(b) Changes in environmental temperature

Fig. 10 Level switching under the condition of environmental temperature changes

Table 1 Level switching for various particles

STATUS	OFF	ON
soil	1.85 V	2.60 V
bubble	1.85 V	2.12 V
tablet (d = 3 mm)	1.85 V	2.40 V
styroform	1.85 V	2.26 V
wheat flour	1.85 V	2.48 V
ash	1.85 V	2.47 V
plastic pellet	1.85 V	2.42 V

移行するときの閾値を表わす。この中で 8 回の開閉のスイッチ動作はすべて正しく動作した。

3.2 さまざまな粉粒体でのスイッチング

3.1.4 項では 36 kg/m^3 のかさ密度の綿で環境温度が異なる場合でのスイッチング特性を示した。かさ密度は粉粒体の音響的特性を表わすひとつの指標である。ここでは 25°C の環境のもとで実プラントに収容される綿とは性質の異なる粉粒体のいくつかの例でスイッチングの特性を調べる。

Table 1 に 7 種類の粉粒体の OFF(開放)–ON(閉塞) 時の電圧を示す。Table 1 より実プラントに収容される粉粒体で感度よくスイッチングできる。

3.3 高温粉粒体での実験

十分な放熱をもたせるために長さが 2 波長の $L \cong 0.90 \text{ m}$ の音響管で、熱した土砂の存在の有無を判別する。土砂のかさ密度は 810 kg/m^3 である。検出端を土砂の近くに設置し熱的定常状態になってから土砂で検出端を塞いだ。Fig. 11 に平鍋で熱している土砂の存在の有無を判別する実験のようす

Fig. 11 Experimental set up and heated gravel

Fig. 12 Temperature of the acoustic tube

Fig. 13 Change in the output voltage when the detecting terminal was covered twice by heated gravel

Fig. 14 Change in the output voltage when the detecting terminal was covered twice by gravel of room temperature

と温度分布を示す。Fig. 12には、音響管の温度分布を示す。温度分布はサーモレーサカメラ (日本アビオニクス F30) で測定した。表面では最高温度 345.4°C であり、かき混ぜて土砂内温度を光温度計 (CUSTOM CT-2000D) で測定すると 450°C であった。

音響管の熱分布は平鍋の外側で検出端側から駆動端側に 100.0°C, 47.8°C であり駆動端付近では、32.1°C, 30.2°C, 30.3°C, 29.8°C, 29.7°C と常温に近づく。ステンレス製の音響管は放熱管としても機能している。

Fig. 13 は高温の土砂の検知のようすを示した。Fig. 14 に同じ音響管の長さで 25°C での土砂の検知のようすを示す。

Fig. 13 では検出端を熱した土砂で二回覆った。一度目は土砂に音響管を急に差し込みゆっくり抜いた。二度目は急に差し 38 s 後に急に抜いた。Fig. 13 にそのときのような出力電圧に現れている。これは 2.2 V に閾値を設定することで正しいスイッチ動作が確認できた。

Fig. 14 では検出端を常温の土砂に二回差し込みと引き抜きをそれぞれ 30 s 行なった。Fig. 14 にそのときのような出力電圧に現れている。これは高温のときと同じく 2.2 V に閾値を設定することで正しいスイッチ動作が確認できた。

4. 結果

以上の実験の結果を整理する。

長さ 0.22 m (周波数 760 Hz, 16°C における音の半波長) で半径 7.0 mm の音響管を共振周波数 760 Hz 近傍の圧電サウナで駆動し、かさ密度 36 kg/m³ の脱脂綿で検出端を閉塞および開放した。音響管温度を 5~80°C で変化させたとき以下のような実験結果が得られた。

- (R1) 共振周波数を含む 740~874 Hz の周波数範囲で圧電サウナのインピーダンスは、開放時は閉塞時より大きい。
- (R2) 開放時共振周波数は 758(±4) Hz であり、この周波数で開閉時のインピーダンス差は最大となった。
- (R3) 音響管長さを決めた温度 (最適条件) で開閉時のインピーダンス差は大きくなり、低温、高温側に温度が変化すると最適条件が崩れ差は小さくなる。しかし固定閾値で開閉が判別できる範囲内に収まった。
- (R4) 一定温度のもとで、かさ密度 13 kg/m³ の粉粒体 (脱脂綿) の有無が判別可能であった。
- (R5) 1/4 波長の部分に設置される防塵フィルタでは、かさ密度 36 kg/m³ で厚さが 26.5 mm 程度の塵埃詰まり状態で、同じかさ密度の粉粒体による開閉が判別できた。また開放状態では、塵埃詰まり厚さに比例して出力電圧が上がった。
- (R6) 温度が 80°C → 5°C に連続的に変化する環境で Fig. 1 に示すアルゴリズムで、動的閾値が適切に動作した。
- (R7) 上記 (R1)~(R6) 条件と異なる長さ 0.90 m の音響管で、345.4~450°C に加熱したかさ密度 810 kg/m³ の土砂の存在の有無が判別できた。

以上より、単体での共振周波数は 720 Hz の圧電サウナに長さ 0.22 m, 半径 7.0 mm の音響管をとりつけ同周波数 760 Hz で駆動した場合、少なくとも 5°C から 80°C の環境温度内でかさ密度 36 kg/m³ の綿を検知できる。温度 25°C でそのほか 7 種類の粉粒体が検知できた。

5. 考察

結果 (R1)~(R2) より、条件 (C2) を満たす物体 (実験では脱脂綿) での検出端の覆いは圧電サウナの共振周波数には、わずしかし影響をおよぼさない。これにより音響管内空気の移動は質量やバネではなく粘性による減衰に表われることが確認できる。これらの結果は (8) 式, (9) 式および (10) 式あ

るいは Fig. 3 に示す理論的検討結果に符合する。結果 (R3) より、音響管温度が音響管長さを決めた温度より高低に変化すると、開放時インピーダンスは小さくなる。これは Fig. 2 に示した $\theta(\tau)/\pi$ が最適点の 1 からずれ、 $|\tan \theta(\tau)|$ は温度が $\pm 50^\circ\text{C}$ 変化すると 0.3 近くまで大きくなることによる。この実験では半波長の音響管を用いたが、半波長の n 倍の音響管を用いると τ の変化に伴う $\theta(\tau)$ の変化は n 倍となり $|\tan \theta(\tau)|$ は大きく変化し、 $\pm 50^\circ\text{C}$ でも開閉に伴うインピーダンスの大小が反転することがあり得る。一方、3.3 節の高温粉粒体実験では 2 波長すなわち $n = 4$ の場合、検出端が 450°C であっても正しく判別した。これは音響管の放熱効果で長い音響管の大部分が常温に近い温度まで放熱されたことによる。したがって、長い音響管は温度変化の影響を受けやすくなるが、環境温度が大きく変化しない限り正常に判別できる。

粉流体のレベル計には付着した塵埃が固着化するという、共通の問題がある。本方式は音響的に音圧が腹（体積速度が節）となる音響管 1/4 波長の奇数倍の場所に塵埃フィルタを設置することで音響管共振への影響を少なくし、結果 (R5) を得た。また開放状態での出力電圧レベルからフィルタ詰まりの程度が判別でき、脱着部からフィルタが交換できる。粉塵が厳しい環境では従来の方式と同じようにエアパージを用いることができ、音響管に定期的にエアを入れ管内の付着を固着する前に吹き飛ばすこととなる。

6. む す び

本論文は、低いかさ密度の粉粒体のレベルを検知する音響管レベルスイッチについて検討した。音響管の数学モデルを構築し、この方式の温度依存性を理論的に説明した。すなわち、ある温度のもとで最適に設計された音響系（一定の音響管長さと駆動周波数）は、温度変化に伴いその最適性が崩れるが、なお判別可能であることを明らかにした。結果として理論的には最適条件温度 $\pm 50^\circ\text{C}$ 程度で正常に判別することが確認され、実験的には余裕をもって温度範囲 $5 \sim 80^\circ\text{C}$ において固定閾値で判別し温度に対してロバストであることが確認された。工業計器として使うレベル計のタンク外の温度は常温 $\pm 50^\circ\text{C}$ 以内であり実用に供しうる。加えて動的閾値法でさらに温度が変化しても対応できる。かさ密度に関しては、 13 kg/m^3 の脱脂綿の判別が可能であることを確認した。防塵フィルタの塵埃の付着のレベルがモニタでき、フィルタ交換の情報が出せることを確認した。最後に音響管が放熱管の役割をすることを利用して、温度が $345.4 \sim 450^\circ\text{C}$ の土砂の存在の有無を判別した。このようなレベルスイッチはゴミ焼却場のアッシュ処理プロセスや、食品・水処理プラントの泡のレベル検知など、悪環境で低いかさ密度の物体の検知に効果的な応用が期待できる。

参 考 文 献

- 1) 日本計量機器工業連合会編集委員会：レベル計，日本計量機器工業連合会 (1993)
- 2) S.S. Novikov, A.S. Maidanovskii, A.P. Rostov and

Y.M. Andreev: Microwave level meter with wire line, KORUS '99 661/662 (1999)

- 3) 鈴木，渡辺，田中，西野，大塚：空気圧方式による自動車燃料計測—実装における諸問題と新しい方法—，計測自動制御学会論文集，**28-4**, 457/463 (1992)
- 4) 渡辺，大木，鈴木，寺田，阿部，藤原：宇宙用タンク内の液量計測，計測自動制御学会論文集，**28-6**, 664/672 (1992)
- 5) G. Lu, M. Seto and K. Shida: A new proposal of multi-functional level meter, IEEE Conference on Multi-sensor Fusion and Integration for Intelligent Systems 2003, 209/212 (2003)
- 6) Z. Chen, G. Hefferman and T. Wei: Multiplexed Oil Level Meter Using a Thin Core Fiber Cladding Mode Exciter, IEEE Photonics Technology Letters, **27-21**, 2215/2218 (2015)
- 7) 渡辺嘉二郎：スイッチ装置，特願平 02-296694 (1990)
- 8) 渡辺嘉二郎：スピーカ，特願平 02-296695 (1990)
- 9) T. Yoshida, K. Kobayashi, Y. Kurihara, N. Shiroy and K. Watanabe: Multiple-Input/Multiple-Output Characteristics of Piezo Devices and an Application for Triage, IEEE Sensors Journal, **17-5**, 1434/1442 (2017)
- 10) M.J. Crocker (Ed.): *Handbook of Acoustics*, Wiley Interscience (1998)

《付 録》

Fig. 1 の音響管部を Fig. A.1 に示す。この音響特性について考える。

この管を伝播する音はつぎの波動方程式で記述できる¹⁰⁾。

$$-\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \frac{A}{\rho(T)} \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \quad (\text{A. 1})$$

$$-\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \frac{\rho(T) \cdot (C(T))^2}{A} \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \quad (\text{A. 2})$$

空気の密度および音速は温度により変化し次式で与えられる。

$$\rho(T) = \frac{1.239 \times P}{1 + T/273.15} \quad (\text{A. 3})$$

$$C(T) = 331.5 \text{ m/s} + 0.6T \quad (\text{A. 4})$$

タンク内外の温度は時間と共に変化するが音響現象的には一定とみなせる。このもとで、(A. 1) 式と (A. 2) 式の波動方程式の初期値を 0 として時間 t についてラプラス変換し求まる x に関する常微分方程式を解く。音響管の [音圧 体積速度]^T について、0 から x までの特性は四端子行列を用いてつぎのように表現できる。

$$\begin{bmatrix} P(x, s) \\ U(x, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \frac{s}{C(T)} x & -\frac{\rho(T)C(T)}{A} \sinh \frac{s}{C(T)} x \\ -\frac{A}{\rho(T)C(T)} \sinh \frac{s}{C(T)} x & \cosh \frac{s}{C(T)} x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(0, s) \\ U(0, s) \end{bmatrix} \quad (\text{A. 5})$$

Fig. A.1 Acoustic tube in Fig. 1

Fig. A.2 Linear temperature distribution along the acoustic tube

角周波数 ω の音で駆動される場合には、つぎのようになる。

$$\begin{bmatrix} P(x, i\omega) \\ U(x, i\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\omega}{C(T)} x & -i \frac{\rho(T)C(T)}{A} \sin \frac{\omega}{C(T)} x \\ -i \frac{A}{\rho(T)C(T)} \sin \frac{\omega}{C(T)} x & \cos \frac{\omega}{C(T)} x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(0, i\omega) \\ U(0, i\omega) \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

条件 (C1) より音響管温度は Fig. A.2 に示すように分布する。

$$T(x) = T_0 + \frac{T_H - T_0}{L} x \quad (\text{A.7})$$

いま音響管を仮想的に $m = L/\Delta x$ に分割し、微小区間 Δx では等温とする。 $\theta(k) = \frac{\omega \Delta x}{C(T(k\Delta x))}$ と定義する。(A.4) 式と (A.7) 式より、

$$\begin{aligned} \theta(k) &= \frac{\omega \Delta x}{331.5 + 0.6(T_0 + \frac{T_H - T_0}{L} k\Delta x)} \\ &= \frac{\omega}{C(T_0)} \cdot \frac{\Delta x}{1 + \frac{0.6(T_H - T_0)}{C(T_0)L} k\Delta x} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

となり、 $k\Delta x \sim (k+1)\Delta x$ の間の四端子行列を

$$F(k\Delta x) = \begin{bmatrix} \cos \theta(k) & -i \frac{\rho(T(k\Delta x))C(T(k\Delta x))}{A} \sin \theta(k) \\ -i \frac{A}{\rho(T(k\Delta x))C(T(k\Delta x))} \sin \theta(k) & \cos \theta(k) \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

とすると、この間の音響特性は

$$\begin{bmatrix} P((k+1)\Delta x, i\omega) \\ U((k+1)\Delta x, i\omega) \end{bmatrix} = F(k\Delta x) \begin{bmatrix} P(k\Delta x, i\omega) \\ U(k\Delta x, i\omega) \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

となる。 $x = 0 \sim L$ の管全体の音響特性は、 $F(0)$, $F(\Delta x) \cdots F(k\Delta x) \cdots F(m\Delta x)$ の積で与えられ、つぎのようになる。

$$\begin{bmatrix} P(L, i\omega) \\ U(L, i\omega) \end{bmatrix} = \prod_{k=0}^m F(k\Delta x) \begin{bmatrix} P(0, i\omega) \\ U(0, i\omega) \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

条件 (C1) より T_H と T_0 の温度差は 100°C であり、(A.3) 式、(A.4) 式より $T = \frac{T_H + T_0}{2} = 50^\circ\text{C}$ を中心とすると、

$0^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C}$ の範囲で $\rho(T)C(T)$ の最大変化率は $\pm 4\%$ 程度であり

$$\rho(T_0)C(T_0) \cong \rho(T)C(T) \cong \rho(T_H)C(T_H) \quad (\text{A.12})$$

と近似できる。この近似のもとで三角関数の加法定理より、

$$\begin{aligned} &\prod_{k=0}^m F(k\Delta x) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \sum_{k=0}^m \theta(k) & -i \frac{\rho(T_0)C(T_0)}{A} \sin \sum_{k=0}^m \theta(k) \\ -i \frac{A}{\rho(T_0)C(T_0)} \sin \sum_{k=0}^m \theta(k) & \cos \sum_{k=0}^m \theta(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

となる。ここで $\Delta x \rightarrow 0$ すなわち、 $m \rightarrow \infty$ での $\theta = \sum_{k=0}^m \theta(k)$ は (A.8) 式より、つぎのように求まる。

$$\begin{aligned} \theta &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_{k=0}^m \theta(k) \\ &= \frac{\omega}{C(T_0)} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_{k=0}^m \frac{\Delta x}{1 + \frac{0.6(T_H - T_0)}{C(T_0)L} k\Delta x} \\ &= \frac{\omega}{C(T_0)} \int_0^L \frac{dx}{1 + \frac{0.6(T_H - T_0)}{C(T_0)L} x} \\ &= \frac{\omega L}{0.6(T_H - T_0)} \ln \left| 1 + \frac{0.6(T_H - T_0)}{C(T_0)L} \right| \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

音響管の長さは環境温度 T_0 のもとでの音速と圧電サウンダの周波数から定まる波長の半波長の整数倍であり

$$L = n \cdot \frac{\lambda(T_0)}{2} = \frac{nC(T_0)}{2f} = \frac{n\pi C(T_0)}{\omega} \quad (\text{A.15})$$

で一定長である。環境温度が T_0 より τ だけ変化したときの θ を $\theta(\tau)$ とすると (A.14) 式と (A.15) 式より

$$\theta(\tau) = n\pi \cdot \frac{C(T_0)}{0.6(T_H - T_0)} \cdot \ln \left| 1 + \frac{0.6(T_H - T_0)}{C(T_0) + 0.6\tau} \right| \quad (\text{A.16})$$

となる。

これより Fig. A.2 の音響管内温度分布のもとで $0 \rightarrow L$ の音響特性はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} P(L, i\omega) \\ U(L, i\omega) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta(\tau) & -i \frac{\rho(T_0)C(T_0)}{A} \sin \theta(\tau) \\ -i \frac{A}{\rho(T_0)C(T_0)} \sin \theta(\tau) & \cos \theta(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(0, i\omega) \\ U(0, i\omega) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

逆に $L \rightarrow 0$ への特性はつぎのようになる

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} P(0, i\omega) \\ U(0, i\omega) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta(\tau) & i \frac{\rho(T_0)C(T_0)}{A} \sin \theta(\tau) \\ i \frac{A}{\rho(T_0)C(T_0)} \sin \theta(\tau) & \cos \theta(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(L, i\omega) \\ U(L, i\omega) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

条件 (C2) より, 粉粒体は粘性特性をもちかつ空気通過断面積は A_p であることより粘性抵抗 R_a は

$$R_a = \frac{\rho(T_H)C(T_H)}{A_p} \quad (\text{A.19})$$

となりこれより, 体積速度はつぎのようになる.

$$U(L, i\omega) = \frac{P(L, i\omega)}{R_a} \quad (\text{A.20})$$

$x = 0$ からみた音響インピーダンスは (A.18) 式, (A.19) 式, (A.20) 式および (A.12) 式よりつぎのように与えられる.

$$\begin{aligned} Z_a(i\omega) &= \frac{P(0, i\omega)}{U(0, i\omega)} \\ &= \frac{\cos \theta(\tau) + i \frac{\rho(T_0)C(T_0)}{AR_a} \sin \theta(\tau)}{\frac{\cos \theta(\tau)}{R_a} + i \frac{A}{\rho(T_0)C(T_0)} \sin \theta(\tau)} \\ &= R_a \frac{1 + i \frac{A_p}{A} \tan \theta(\tau)}{1 + i \frac{A}{A_p} \tan \theta(\tau)} \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

[著 者 紹 介]

吉 田 智 哉

2015 年法政大学大学院理工学研究科システム工学専攻修士課程修了. 2016 年法政大学大学院工学研究科システム理工学専攻博士課程入学, 現在に至る.

小 林 一 行 (正会員)

1994 年法政大学大学院工学研究科博士課程修了. 博士 (工学). 後, ミシガン州オークランド大学客員研究員を経て法政大学工学部専任講師, 助教授, 准教授, 2009 年より教授, 2011 年より理工学部創生科学科, 現在に至る. システム工学の研究に従事, 日本知能情報ファジィ学会, SAE, AUUSI, IEEE などの会員.

鈴 木 郁

1991 年慶應義塾大学大学院理工学研究科管理工学専攻博士課程修了 (工学博士). 97 年法政大学工学部経営工学科助教授, 2002 年同教授を経て 2011 年より法政大学理工学部創生科学科教授. 人間工学, 人間工学へのセンサ応用などの研究に従事. 日本人間工学会, 電子情報通信学会の会員.

山 下 浩 二

1994 年関西オートメーション (株) 入社. 製造, メンテナンス部門を経て, 設計, 開発部門に配属, 現在に至る. レベルスイッチ, レベルメータの設計, 開発に従事. 技術部開発課長.

渡 邊 嘉二郎 (正会員)

1972 年東京工業大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了 (工学博士). 2010 年東京医科歯科大学論文博士 (博士 (医学)). 72 年法政大学工学部計測制御専攻専任講師, 75 年同助教授を経て, 84 年同大学大学院システム工学専攻教授. 2015 年同大学を定年退職し 4 月より同大学名誉教授, 現在に至る. 現在, 技術士事務所センシング・コントロール・ラボ主宰. 制御工学, センサ工学, 故障診断, 生体工学などの研究に従事. 電気学会, IEEE などの会員.