110 差圧伝送器による導圧管の詰まり診断に関する研究

第1報：揺動の RMS 値による診断

Diagnosis of Impulse Line Blockage with Differential Pressure Transmitter

Part1 Diagnosis with RMS value of fluctuation

○准 栄野隼一 (早 大), 正 涌井徹也 (早 大), 正 橋詰匠 (早 大)
宮地宣夫 (横河電機), 齋藤洋二 (横河電機), 西島剛志 (横河電機), 桑山秀樹 (横河電機)

Jyun-ichi EINO, Tetsuya WAKUI, Takumi HASHIZUME, Waseda University, 17 kikui-cho, Shinjuku-ku, TOKYO

Nobuo MIYACHI, Yoji SAITO, Takashi NISHIJIMA, Hideki KUWAYAMA, Yokogawa Electric Corporation

Differential pressure transmitters with an orifice are widely used as field flow meters. The typical trouble of the differential pressure transmitters under operation is an impulse line blockage. Thus, the authors develop a detecting method of the impulse line blockages using the R.M.S. value of fluctuations of measured pressures. This method always monitors not only the fluctuation of differential pressure but also those of two static pressures, which means the high side pressure and low side pressure. The experimental investigations show that this monitoring makes it possible to detect a both side blockage and either side blockage before the blockages have an serious influence on measuring the differential pressure.

Key Words: Fault diagnosis, Monitoring, Pressure measurement, Fluid flow measurement, Fieldbus

差圧伝送器とオリフィスを用いた流量計測は、適用範囲が広く安価なため、プロセス分野で広く用いられている。この差圧式流量計の不具合の大きな部分は、オリフィスと差圧伝送器を接続する導圧管の詰まりが占めるといわれている。現在は定期的な点検によって導圧管の詰まりをチェックしているが、突発的に詰まりが生じた場合にはライン停止のために大きな損失が発生することになる。そこで、導圧管詰まりのオンライン監視・診断技術の確立が求められている。

その一方で、近年はフィールド機器のインテリジェント化が進み、P A用フィールドバス対応機器は自己診断の結果をプロセス値とともに送信し、制御システムにてこれを集中管理することができる。この自己診断機能の一つとして導圧管詰まりのオンライン診断機能を搭載することができるならば、上記の問題を解決できるものと考えられる。そこで、本研究は高圧側と低圧側の両方の導圧管に詰まりが発生した場合だけでなく、片側の導圧管のみに詰まりが発生した場合をも含めた、導圧管の詰まり診断技術を開発することを目的としている。

本報では、詰まり診断の第一段階として、水流ラインを用いた導圧管の詰まり模擬装置(Fig.A1)を構築した。導圧管の詰まりはニードル弁の弁開度（以後、弁開度）を操作することにより再現する。その上で、詰まりが差圧の測定に及ぼす影響を調査するために、静特性実験だけでなく、制御ループの観測量としての使用も想定して動特性実験も実施した。静特性実験では、詰まりの種類を問わず、弁開度 5%以上では測定値に影響を与えないが、2%以下では詰まった側の圧力信号が大きく減衰し、正常な測定値が得られないことがわかった。また、動特性実験においては、弁開度が小さくなると圧力信号の伝達に遅れが生じ、逆応答やオーバーシュートが見られ

た。しかし、時定数 1[s]のダンピングを入れることにより、弁開度 5%の場合でも制御ループへの影響がほとんど現れないことを明らかにした。これらの実験により、弁開度 5%相当になるまでに詰まりを検知できればよいことがわかった。

さらに、導圧管の詰まりと測定値に含まれる揺動の関連性に着目し、“圧力揺動の RMS 値”という定義量を用いて導圧管の詰まりとの関係を調査した。その結果、高圧側圧力、低圧側圧力、差圧それぞれの揺動に対する RMS 値は、詰まり状態の特徴を適切に表すことを明らかにした。したがって、両側の導圧管に詰まりが発生した場合だけでなく、任意の片方の導圧管だけに詰まりが発生した場合も検知できるものと考えられる。

Fig.A1 Test section

1. 背景

プロセスオートメーション (PA) 分野では、流量計が数多く使用されている。中でも適用範囲 (作動流体・温度条件) が広いこと、可動部がないため故障しにくく TCO に優れることなどの理由からオリフィス式流量計が広く使われている。オリフィス式流量計は、オリフィスと差圧伝送器、導圧管から構成されており、不具合の発生は導圧管に関するものが最も多い。さらにその詳細を見ると、詰まり、漏れ、腐食などが原因として挙げられ、発生件数の多さから導圧管の詰まりが大きな問題になっている。漏れは外見からは検知可能であり、また、腐食はその周期性からある程度の予測は可能であるため、定期的な点検により対処できる。しかし、詰まりは検知や予測が容易でなく、突発的に発生することもあることから、予期せぬ保守 (ライン停止) による損失を防ぐためにも、オンライン診断技術の確立が求められている。

その一方で、近年の情報通信、機械製造の技術向上に伴い、フィールド機器のインテリジェント化も進んでいる。例えば、PA 用フィールドバス規格の 1 つである FOUNDATION Fieldbus においては、プロセス値の送信機能に加え、プロセス値がある閾値を超えた場合に自立的に警報するアラーム機能や、通信ケーブル切断やセンサ異常等を検知する自己診断機能を有している。よって、導圧管詰まりのオンライン診断を自己診断機能の 1 つとして差圧伝送器に搭載することができれば、プラントの保守性が大きく向上するものと考えられる。

2. 目的

従来は導圧管の詰まりを検出するために、測定した差圧の揺動に着目した手法⁽²⁾がとられてきた。この手法は、低压側の導圧管と高压側の導圧管の両方が詰まった場合には、その状態を検出できるが、片方のみ詰まった場合には検出することができない。導圧管が詰まる原因には、1) 流体中に含まれる異物の侵入、2) 流体中に溶けていた物質が析出して固着、3) 周辺雰囲気温度低下による流体の凍結、などが考えられ、必ずしも両側の導圧管が同時に詰まるとは限らないため、片側詰まりの検知は詰まり診断の重要な要件と言える。また、導圧管の詰まりが差圧の測定にどのように悪影響を及ぼすかについても、これまで詳細な調査は行われていない。そこで本研究は、両側だけでなく片側の導圧管が詰まった場合に、差圧の測定に問題が発生する前に詰まりを検出できる手法を考案し、デジタル式差圧伝送器に実装することを目的とする。本報はその第 1 段階として、まず、水流ラインで圧力 (差圧、静圧) の揺動を測定し、導圧管詰まりとの相関性を定量的に評価する。その上で、圧力揺動の RMS 値が詰まり状態の監視に有効であることを示している。

3. 実験設備・計測装置

実験設備および計測装置の概略図を Fig.1 に示す。水槽からポンプ (2.1[m³/min], 100[m]) で圧送された水は、ポンプ出口弁、ストレーナ (100 メッシュ) を経た後に、実験区間に流入する。運転動作点 (圧力と流量) は主にポンプ出口弁とオリフィス下流の調節弁により設定するが、一部の試験ではオリフィス上流のボール弁も使用する。オリフィス前後の圧力タップとデジタル式差圧伝送器 (以後、差圧伝送器) とを接続する導圧管には、詰まり状態を模擬するために、ニードル弁 (株式会社フジキン: UN-14MB-S, 定格 Cv 値 0.015) を取り付けられている。本研究は詰まり検出機能を差圧伝送器に

Fig.1 Experimental installation

搭載することを目的とするが、圧力揺動のより詳細な把握のため、差圧伝送器よりも応答速度の早いアナログ式圧力センサ (横河電機: FP110, 時定数 3[ms]以下、以後、圧力センサ) を、高压側と低压側それぞれの導圧管に取り付ける。なお、特に断りがない場合には、差圧伝送器による測定値を使用する。差圧測定部の拡大図を Fig.2 に示す。供試差圧伝送器は、受圧部の 2 つの振動子の振動数を測定することにより、差圧とラインの静圧 (高压側圧力・低压側圧力) を同時に計測することができる⁽³⁾ため、本研究でも同様の手法を採用する。また、圧力データの取得間隔を任意に設定し、取得したデータを自由に取り扱うために、受圧部振動子の振動数を外部に設置した周波数カウンタ (横河電機: TC110) で計測する。計測した周波数は GPIB 通信で PC (Pentium III 600[MHz]) へと送信して PC 上で圧力を算出する。また、周波数カウンタにおける振動数の積算時間 (以後、積算時間、ここでは 25[ms], 100[ms] の 2 通りに設定) を操作するために、周波数発生器 (Yokogawa-Hewlett-Packard: HP3314A) も使用している。圧力センサの出力 (電圧信号) は AD カード (Contec: AD16-16(PC)EH) を用いて前述の PC で取得する。以上の計測装置の構成を Fig.3 に示す。なお、圧力センサは 5[ms] 毎に 20 点のデータを取得し、ノイズの影響を低減するために、その単純平均値を出力とする。また、差圧伝送器を用いた計測では、積算時間に加えて、振動数の計算と GPIB 通信に合計 12[ms] 必要とするため、積算時間 25[ms], 100[ms] の場合のデータ測定周期はそれぞれ 37[ms], 112[ms] となる。したがって、ナイキストのサンプリング定理により、各計測条件における測定可能な最大周波数は Table1 のようになる。なお、これらとは独立に、オリフィス上流の圧力を測定するために、圧力伝送器 (横河電機: EJA430) も設置している。

Fig.2 Test section

Table1 Measurable maximum frequency

Sensor	Sampling rate ms	Measurable maximum frequency Hz
Differential pressure transmitter	37	13.5
	112	4.5
Pressure sensor	5	100

Fig.3 measurement construction

4. 導圧管の詰まりが差圧計測に与える影響

4. 1 詰まり状態の定義と再現方法

本研究では、運転中に起こりうる3通りの導圧管の詰まり状態を定義する。模擬方法は以下の通りである。

- 1) 高压側詰まり：高压側のみが詰まっている状態。低压側のニードル弁は全開で固定し、高压側のニードル弁弁開度のみを変化させる。
- 2) 低压側詰まり：低压側のみが詰まっている状態。高压側のニードル弁は全開で固定し、低压側のニードル弁弁開度のみを変化させる。
- 3) 両側詰まり：高压側、低压側の両方が同様に詰まっている状態。両方のニードル弁の弁開度を同一で変化させる。

なお、ニードル弁の弁開度（以後、弁開度）は、定格 C_v 値 0.015 に対する現在の C_v 値比で定義する。また、最大弁開度の 100% 時を詰まりのない状態と見なす。

4. 2 静特性

高压側詰まり、低压側詰まり、両側詰まりの3通りの詰まり状態での定常時の差圧を調査する。まず、詰まりのない状態で、オリフィス上流圧力を 900[kPa]、オリフィス前後差圧を 45[kPa] とした上で、弁開度を 100% から 10% 刻みで減少させる。さらに 10% 以下では 5, 2, 1.5% とする。それぞれの弁開度で定常状態になったことを確認後、差圧を 20 秒間測定し、その単純平均値を測定値とした場合の結果を Fig.4 に示す。これより、弁開度が 5% 以上であれば、いずれの詰まりの状態でも差圧の測定に影響を及ぼさないことがわかる。しかし、弁開度がさらに小さくなると、測定値はそれまでの値から大きく外れ、高压側詰まりの場合は急激に減少し、低压側詰ま

Fig.4 Static characteristics of differential pressure

a) No blockage

b) Both side blockage

c) High side blockage

d) Low side blockage

Fig.5 Dynamic characteristics of differential pressure

りの場合は急激に増加している。これは、詰まりにより管路抵抗が増大し、導圧管内の圧力伝播が減衰するためである（詳細は後述）。これより、弁開度 5% 相当まで詰まりが進行しなければ、差圧の測定は十分可能であることを明らかにした。

4. 3 動特性

多くの場合、測定差圧を制御ループの観測量として使用するため、静特性のみならず動特性に対する詰まりの影響も調査する必要がある。そこで、まず、オリフィス上流圧力を 900[kPa]、オリフィス前後差圧を 45[kPa] とした上で、オリフィス上流のボール弁（初期状態は全開）を閉め、上流圧力 800[kPa]、差圧 40[kPa] とする。その後、ボール弁を手動で全

Fig.6 Relation between time constant and blockage

Fig.7 Differential pressure with 1[s] damping

開にすることで、水流量をステップ状に変化させる。この時の詰まりなし、両側詰まり（弁開度 5%）、高圧側詰まり（弁開度 5%）、低圧側詰まり（弁開度 5%）の 4 つの状態における差圧の測定値を Fig.5 に示す。図中破線時に水流量がステップ状に変化している。本実験は測定差圧の応答性を評価することを目的とするため、圧力センサによる測定値を用いる。この時、揺動の影響が大きくなることから、5[ms]毎の測定値に対して、さらに移動平均処理（サンプル数：11 点）をしている。

Fig.5 より、詰まりがない場合はほぼ 1 次遅れ系に近い応答となるのに対して、高圧側詰まりの場合は逆応答で差圧が過渡的に負になり（Fig.5-c）、低圧側詰まりの場合はステップ入力幅 10%に対して 40%以上のオーバーシュート（Fig.5-d）を生じていることがわかる。この原因を調べるため、水流量のステップ上変化に対する高圧側と低圧側の測定圧力の応答に見る時定数と詰まりの関係を図 6 に示す。弁開度 5%まではいずれの時定数もほぼ 0.1[s]であるが、弁開度 5%以下では急激に増大することがわかる。よって、詰まりがない側の圧力がより早く変化し、上述のような差圧の応答になっている。このような制御量の変化は制御動作を不安定にするため、好ましくないと考える。さらに、測定差圧の出力に時定数 1[s]のダンピングをかけた場合の差圧信号を図 7 に示す。これよ

Fig.8 Influence of blockage on static pressure

り、ダンピングをかけることで最大行き過ぎ量が 1%に、逆応答も最大で 3%に低減されていることがわかる。多くの制御ループでは、観測量へのダンピング時定数が 1~2[s]、制御周期が 1[s]であることに留意すると、弁開度が 5%の場合でも制御ループの挙動には大きな問題は生じないと考えられる。

5. RMS 値による詰まり診断

5. 1 RMS 値の定義

前章にて、両側詰まり、片側詰まりに関わらず、弁開度が 5%以下にならないと、差圧計測に影響を及ぼさないことを明らかにした。そこで、差圧計測に影響がでる前（弁開度 5%相当になる前）に詰まりを検知可能であるか検討する。始めに、導圧管が詰まった際の圧力揺動特性を調べるために、全開時と弁開度 5%の高圧側詰まり時の高圧側圧力を比較する（Fig.8）。これより、全開時は揺動の幅が 20[kPa]程度であるのに対して、弁開度 5%の場合は 5[kPa]程度に減少していることがわかる。そこで、詰まりが揺動の減衰に及ぼす影響を定量的に評価する。揺動の評価方法として、標準偏差を用いる⁽³⁾ことも可能であるが、ここでは、揺動変化を検出する適切な評価関数として圧力階差の 2 乗和平方根に着目する⁽⁴⁾。本研究ではこれを圧力揺動の RMS(Root Mean Square)値と定義する。例えば、高圧側圧力 P_H の RMS_H 値は以下のように求められる。

$$RMS_H = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_{Hn} - P_{Hn-1})^2}$$

ただし、 N ：圧力測定回数、 P_{Hn} ： n 回目の高圧側圧力測定値

5. 2 詰まり実験

4.2 節と同様の実験方法により、導圧管が詰まった際の高圧側圧力、低圧側圧力、差圧それぞれの揺動の RMS 値を調査する。差圧伝送器を用いて、積算時間を 100[ms]とした結果を図 9 に、積算時間を 25[ms]とした結果を図 10 に、圧力センサを用いて計測した結果を図 11 にそれぞれ示す。

これより、導圧管の詰まりと RMS 値には以下の関係があることが明らかとなった。

- 1) 両側詰まりの場合：詰まりの進行（弁開度が小さくなる）とともに、高圧側圧力、低圧側圧力、差圧の全ての RMS 値が減少する。
- 2) 高圧側詰まりの場合：詰まりの進行とともに、高圧側圧力の RMS 値は減少するが、低圧側圧力の RMS 値は特に変化せず、差圧の RMS 値は増加する。
- 3) 低圧側詰まりの場合：詰まりの進行とともに、低圧側圧力の RMS 値は減少するが、高圧側圧力の RMS 値は特に変化せず、差圧の RMS 値は増加する。

すなわち、高圧側圧力の RMS 値、低圧側圧力の RMS 値、差圧の RMS 値を監視することで、両側詰まりだけでなく、どちらか片方のみが詰まった場合でも検知することができる。さらに、RMS 値の大きさにより、詰まりの進行状況も推測できるようになる。また、積算時間を 100[ms]とした場合よりも 25[ms]とした方が RMS 値がより大きく低下し、圧力センサによる計測ではより顕著になることがわかる。ただし、いずれの測定においても、弁開度が 20%の場合には RMS 値が減少し始めていることから、適切な閾値を設定することにより、差圧計測に問題が生じる前に詰まりを検知できると考える。

5. 3 考察

前節にて、RMS 値を監視することによって、差圧計測に問題が生じる前に詰まりを検知できることを明らかにした。ここではさらに、使用する測定器や積算時間により、検知能力に差が生じる原因について考察を加える。Fig.9~Fig.11 に示

す計測は、それぞれ測定可能な周波数域に大きな違いがある (Table3.2)。そこで、低圧側詰まり実験における圧力センサの出力を周波数解析した結果 (パワースペクトル密度) を Fig.12 に示す。これより、詰まりが進行する (弁開度が減少する) につれて、高周波数域から揺動が減少していることがわかる。例えば、Fig.12-a (弁開度 100%) と Fig.12-b (弁開度 60%) を比較すると、80~100[Hz]のパワースペクトル密度のみ減少し、それ以外の周波数帯域では変化がほとんど見られない。しかし、Fig.12-c (弁開度 20%) では 10[Hz]以上の周波数域において、さらに Fig.12-d (弁開度 5%) では 1.5[Hz]以上の周波数域においてパワースペクトル密度がそれぞれ減少している。圧力センサは 5[ms]周期で計測するため、100[Hz]までの変化を検知することができる。そのため、弁開度 60%でも低圧側圧力の RMS 値が減少している。これに対して差圧伝送器で積算時間を 25[ms]とした場合には、13.5[Hz]以下の変化しか検

知できないため、低圧側圧力の RMS 値に変化は見られない。なお、低圧側圧力の RMS 値が低下し始めるのは弁開度 30%である。差圧伝送器で積算時間を 100[ms]とした場合はこの傾向がさらに顕著になり、弁開度 10%で低圧側圧力の RMS 値が減少し始める。これより、検知能力の点からみれば、圧力の測定周期 (差圧伝送器における積算時間) を短くすることが好ましいと考えられるが、ここにとりあげた 3 通りの測定方法によるならば、いずれの場合も、詰まりが弁開度 5%相当にまで進行する前に検知することが可能である。

6. 結言

デジタル式差圧伝送器にて導圧管の両側詰まり、片側詰まりを検出するために、水流設備にてニードル弁を用いた詰まり模擬実験を行った。まず、導圧管の詰まりが差圧の測定

Fig.9 RMS values measured with differential pressure transmitter (totalizing time: 100 [ms])

Fig.10 RMS values measured with differential pressure transmitter (totalizing time: 25[ms])

Fig.11 RMS values measured with pressure sensor

に及ぼす影響を調査するために、静特性実験と動特性実験を行った。静特性実験では、詰まりの種類を問わず弁開度 5% 以上では測定値に影響を与えないものの、2%以下では詰まった側の圧力信号が大きく減衰し、正常な測定値が得られないことがわかった。また、動特性実験においては、弁開度が小さくなると導圧管内への圧力伝播の時定数が大きくなり、逆応答やオーバーシュートが見られたが、時定数 1[s]のダンピングを入れた場合には、制御ループへの影響はほとんど現れないことを明らかにした。以上のことを総合すると、弁開度 5%相当の詰まり状態になる前に検知できれば十分と言える。

さらに、導圧管の詰まりと測定値に含まれる揺動の関連性に着目し、“圧力揺動の RMS 値”を定義して、詰まり状態を定量評価した。その結果、高压側圧力、低压側圧力、差圧それぞれの揺動の RMS 値を監視することで、両側詰まりのみならず、任意の片方の導圧管だけが詰まった場合も検知できることを明らかにした。また、その検知能力は圧力の測定周期（差圧伝送器における積算時間）を短くすると向上することも確認した。しかし、ここにとりあげた 3 通りの測定方法によるならば、いずれの場合も、詰まりが弁開度 5%相当にまで進行する前に検知することが可能である。

本報では、導圧管の詰まり診断の第 1 報として、運転動作点一定の下での調査を行った。今後は、運転動作点の変更に対応した具体的な詰まり診断方法を構築する予定である。

文 献

- (1) 泉頭太郎, リモートシール形差圧発信機による導圧管レス計装 vs ダイレクトマウントによる導圧管レス計装, 計装, Vol.42 No.2, (1999), pp32-36.
- (2) R.SZANYI, M.RATERMAN, E.ERYUREK, Diagnostics capabilities of FOUNDATION fieldbus pressure transmitters, HYDROCARBON PROCESSING, 2003.4, pp 53-55,58-59.
- (3) 石川 環, 尾土平 澈, 新国 雅章, 小山 越太郎, 津曲 哲郎, 浅田 龍, 新差圧・圧力伝送器 Dpharp EJX シリーズ, 横河技報, Vol.48 No.1, (2004), pp13-18.
- (4) 宮地 宣夫, 藺田 薫, 赤堀 秀雄, 差圧伝送器の導圧管詰まり診断, 横河技報, Vol.48 No.1, (2004), pp33-36.

Fig.12 Power spectral density of low side pressure