214 管路・伝熱管の肉厚変化の診断技術に関する研究

第1報：直管路を水が流れる場合

Diagnosis of thickness of piping and heat exchanger tubes

Part1: Case of water flowing in a straight pipe

○学 稲葉 亘 (早大院/静岡ガス), 正 柴野隼一 (早大), 正 橋詰 匠 (早大)

Wataru INABA, Jyun-ichi EINO, Takumi HASHIZUME, Waseda University, 17 kikui-cho, Shinjuku-ku, TOKYO

Major items of equipment of process plants are piping and heat exchangers. Their typical troubles with aging are mainly caused by scale adhesion and erosion-corrosion. The former decreases flow rate, pressure and heat transfer performance, the latter breaks piping and heat exchanger tubes. Therefore, the purpose of this study is to derive the diagnostic method of pipe thickness which is more effective than the monitoring pressure. In this paper, the diagnostic method of pipe thickness in water line is developed experimentally. It is based on the phase of the transfer function of low-side pressure to high-side pressure in the test section. The experimental results show that this diagnostic method is superior to monitoring pressure on detecting a changing pipe thickness.

Keywords: Diagnosis, Pipe thickness, Phase, Differential pressure transmitter

1. 背景

プロセスオートメーション分野において、設備の不具合を始めとする物的要因、または不注意や技術習得不足といった人的要因による事故が少なくない⁽¹⁾。そのため、老朽化した設備を少ない人員でより安全に効率良く管理・保全するために、常時システムを監視し、技術者の管理・保全作業をサポートする、プロセス診断システムの開発が求められている。特にプラントの構成要素の主体となる、配管や熱交換器を診断する技術への要望は高い。

配管の診断は多くの研究がされており、長い歴史がある。細貝らは配管の任意の場所を自動で測定することができる診断ロボットについて研究し、これまでにフランジ部など障害物を回避しながら配管の肉厚測定ができる自律移動型ロボットの開発に成功している⁽²⁾⁽³⁾。また、近藤らは、超音波を用いた検査ビグを開発、実用化し、多数の長距離パイプラインの腐食・変形診断に成功している⁽⁴⁾。しかし、前者はあらゆる場所を移動できるわけではないため、測定区間の移動に人の手を借りる必要があり、後者は検査時にラインを停止する必要があるため、両者ともオンラインでの診断に対応することが難しい。また、熱交換器の診断に関しては、熱通過率を算出して、チューブへのスケール付着等を評価する手法⁽⁵⁾があるが、これには多数のフィールド機器が必要で、実用上課題が少なくない。

一方で、プロセスオートメーションにおける多機能なフィールドバス規格として FOUNDATION Fieldbus⁽⁶⁾⁽⁷⁾の普及が進んでいる。この規格に対応したフィールド機器は、双方向デジタル通信が可能のため、異常発生時にのみ DCS へ通知することで、DCS に負荷をかけることなく診断システムを構築ができる。したがって、配管や熱交換器等への診断機能をフィールドバスに対応するフィールド機器に搭載すれば、低廉で恒常的な監視が可能となり、侵食・腐食による配管破損等の防止や、エネルギーロスの改善等に貢献できると考える。

2. 目的

本研究は、1 台のフィールド機器を用いて配管や熱交換器伝熱管等の肉厚変化を診断する技術を確認することを

目的とするが、プラントにおいて配管や熱交換器等の構成は様々である。そこで本報では、第一段階として、配管構成の中でも最も基本的な直管路を対象に、水が流れる場合について、管路の肉厚変化を診断する手法を明らかにすることを目的とする。

管路の肉厚変化の診断に類似するものとして、著者らのオリフィス式流量計の導圧管の詰まり診断⁽⁸⁾⁽⁹⁾に関する研究が挙げられる。本研究が対象とするのは、管路の肉厚変化であるが、導圧管の詰まり診断ではオリフィス前後の圧力タップと差圧伝送器を結ぶ導圧管に詰まりが発生する場合を対象とした。そこでは、導圧管に挿入したバルブの絞りで詰まりを模擬した。一例として、低圧側の導圧管の詰まりを模擬した状態を Fig.1-a) に示す。ここで、Fig.1-a) の詰まりを模擬しているバルブをメインライン中に移動させると Fig.1-b) のようになり、メインラインは絞られ、局所的に管路が狭くなった状態を模擬することとなる。しかし、本研究で対象とする管路の肉厚の変化は局所的なものではなく、一様な肉厚変化が一定区間にわたるもので、この状態を模擬したものが Fig.1-c) である。すなわち、内径の異なる管路を用いて肉厚変化を模擬することとなる。

したがって、Fig.1-c) のように管路の一様な肉厚変化を診断することが本報の目的であるが、診断の手法については導圧管の詰まり診断で得た知見を活用する。そこで、ま

Fig.1 Similar conditions.

ず導圧管の詰まりと類似なメインライン中に局所的な肉厚変化が存在する場合 (Fig.1-b)) の診断を取り上げ、その後、メインラインの肉厚が一樣に変化する場合の診断を取り上げる。

3. 実験設備

本章では、実験設備および測定系の概要について記す。実験設備には、局所的な肉厚変化と一樣な肉厚変化を模擬するために2形態の実験ラインを設けている。

3. 1 局所的な肉厚変化実験ライン

局所的な肉厚変化を有する実験ラインは、多段渦巻きポンプ (1.2[m³/min], 100[m]) と管径 3B (口径: 約 80[mm])、管径 1B (口径: 約 25[mm]) の配管用炭素鋼管 (SGP) で構成されており、水槽の水はポンプで揚水された後、ストレーナ (100 メッシュ) にてゴミを取り除かれ、局所的な肉厚変化を模擬するグローブ弁 (以下、模擬用グローブ弁) が設置された試験区間へ流入する。同実験ラインのフローシートを Fig.2 に、試験区間の詳細を Fig.3 に示す。

試験区間中の流量計下流のグローブ弁を肉厚変化模擬用としている。圧力測定用の導圧管の長さはそれぞれ約 3[m]とし、模擬用グローブ弁の上流 55[mm]にある圧力取り出し口と、下流 160[mm]にある圧力取り出しタップとを差圧伝送器に接続する。

3. 2 一樣な肉厚変化実験ライン

一樣な肉厚変化を有する実験ラインは、局所的な肉厚変化を有する実験ラインに変更を施したもので、内径の異なる

管路により一樣な肉厚変化を模擬している。同実験ラインのフローシートを Fig.4 に、試験区間の詳細を Fig.5 に示す。また、使用する肉厚変化模擬用管路の種類 (以下、模擬用管路)、内径、SGP 鋼管: 1B の断面積を 1 としたときの各模擬用管路の断面積の割合を Table1 に示す。

圧力測定用の導圧管の長さはそれぞれ 5[m]とし、管路長 (取り出し位置の違い) の影響を調査するために、Fig.5 に示すように模擬用管路の高压側と低压側それぞれに 300[mm], 600[mm]の位置 (計 4 箇所) と詰まり模擬用管路 5 箇所に圧力取り出し口を設けている。差圧伝送器へは全 9 つのうち 2 つの圧力取り出し口と接続するので多数の組み合わせが考えられるが、本報では Fig.6 に示す通り、5

Table1 Differential pressure of each measurement condition.

No	Type of pipe	Inner diameter mm	Cross section ratio %
1	STS sch160	21.2	59.0
2	STPG sch80	25.0	82.0
3	STPG sch60	26.2	90.0
4	STPG sch40	27.2	97.1
5	SGP	27.6	100
6	SUS sch 10S	28.4	105.8
7	SUS sch5S	30.7	123.7

Fig.2 Flow sheet of experimental installations (Lumped change in thickness).

Fig.4 Flow sheet of experimental installations (Distributed change in thickness).

Fig.6 Pressure measurement position.

Fig.3 Detail of test section (Lumped change in thickness).

Fig.5 Detail of test section (Distributed change in thickness).

通りの組み合わせを採用する。高圧側圧力取り出しタップと低圧側圧力取り出しタップの区間が最も長い測定区間を A とし、そこから圧力取り出しタップがひとつずつ内側になるごとに測定区間 B, C, D, E とする。

3. 3 測定系の概要

本研究は、最終的にはフィールドバス対応のマルチセンシング式差圧伝送器 1 台による診断手法の構築を目指す。診断対象の特性を明らかにするため、マルチセンシング式差圧伝送器（横河電機：EJX110J）だけでなく、より高周波数域の信号を測定できる小形圧力センサ（横河電機：FP110）を 2 台使用する。使用する差圧伝送器は内部にある特殊な 2 つの振動子の周波数を測定することにより、差圧だけでなく高圧側圧力と低圧側圧力を算出できる機能を有する⁽¹⁰⁾。具体的には、周波数発生器（横河電機：FG120）で設定した周期ごとに周波数カウンタ（横河電機：TC110）で振動子周波数を測定する。そしてこの振動子周波数を GPIB 通信により PC へと送信し、上記 3 つの圧力を算出する。本実験では、振動子周波数を 100[ms]ごとに測定するが、測定データの PC への通信に 12[ms]を要するため、3 つの圧力の測定周期は 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、測定周期 112[ms]における測定可能な最大周波数は 4.45[Hz]となる。

小形圧力センサの出力と試験区間に設ける電磁流量計の出力は AD カード（Contec：AD16-16(PC)EH）を介して前述の PC で取得する。なお、小形圧力センサでは 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。

以上の差圧伝送器、小形圧力センサ、電磁流量計の接続構成を Fig.7 に示す。なお、差圧伝送器では測定時間を 5[min]とし、小形圧力センサでは測定時間を 2[min]とする。

Fig.7 Construction of measurement system.

4 局所的な肉厚変化を有する場合

4. 1 実験方法

運転動作点は模擬用グローブ弁の低圧側圧力を 600[kPa]、試験区間流量を 0.10[m³/min]で一定とする。局所的な肉厚変化（流路が狭くなる）は、模擬用グローブ弁を全開(5.25), 5, 4.5, 4, 3.5, 3, 2.5, 2, 1.5, 1 回転へと絞っていくことで模擬する。その時の模擬用グローブ弁の高圧側圧力と低圧側圧力を、差圧伝送器と小形圧力センサによって測定する。

4. 2 圧力揺動の RMS に基づく評価

従来の研究により、オリフィス式流量計の導圧管に詰まりが生じると、圧力信号に含まれる高周波数成分（以後、圧力揺動と呼ぶ）が変化することが明らかになっている⁽⁸⁾。そこで、同手法を局所的な肉厚変化を有する管路の詰まり（絞り）の診断にも適用する。圧力揺動の定量評価には、

式(1)、式(2)に示す圧力階差の RMS を用いる。

$$\Delta P_n \equiv P_{n+1} - P_n \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} (\Delta P_n)^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、N：測定回数、 P_n ：n 回目の圧力測定値[kPa]。

実験結果から、差圧、高圧側圧力、低圧側圧力の RMS を算出し、弁開度との関係をまとめたものを Fig.8 に示す。Fig.8 より、弁開度が減少すると低圧側圧力の RMS が若干減少し、差圧の RMS は増加する傾向を示すが、模擬用グローブ弁の弁開度が約 2 回転までは、RMS はかわらない。なお、弁開度が 1 回転の時に差圧の RMS が急激に減少するのは、差圧伝送器の測定レンジである 100[kPa]を大きく越えたためと考えられる。

ここで比較のために、模擬用グローブ弁の各開度における差圧を Fig.9 に示す。図より、弁開度が 2.5 回転以上になると、差圧が大きく上昇することがわかる。なお、弁開度が 1 回転のときの差圧は 155[kPa]と大幅に上昇したため、図には記載していない。このことから、RMS よりも差圧による評価の方が、局所的な肉厚変化を有する管路に対しては、検出感度が高いことがわかる。

Fig.8 RMS vs. valve opening.

Fig.9 Differential pressure vs. valve opening.

4. 3 圧力揺動の位相分布に基づく評価

測定区間の高圧側圧力、低圧側圧力はほぼ同じ距離の導圧管内部を伝播することから、メインラインの圧力は差圧伝送器へほぼ同時に到達するものと考えられる。一方で、試験区間の管路内径が模擬用グローブ弁によって絞られ小さくなれば、メインラインの圧力は流路が狭くなった管路を通り、低圧側導圧管から差圧伝送器および小形圧力センサに到達するため、管路内径が絞られることにより圧力伝播に影響を受けることが推測される。

そこで、圧力伝播の遅れを高圧側圧力信号と低圧側圧力信号の伝達関数の位相（以後、位相とする）を用いて、定

量的に評価する。具体的には、まず高压側圧力信号を系の入力、低压側圧力信号を系の出力とし、周波伝達関数を算出する (Matlab の tfe 関数を利用)。そして、式(3)に示すように、各周波数で高压側圧力信号に対する低压側圧力信号の伝達関数から位相 $\Delta\phi(f)$ を算出する。

$$\Delta\phi(f) = \angle F(2\pi jf) \quad (3)$$

ここに、 f : 周波数 [Hz], $\Delta\phi(f)$: 周波数 f [Hz] の位相 [deg], $\angle F(2\pi jf)$: f [Hz] の周波数伝達関数における位相 [deg]。

Fig.10 に、弁開度全開 (5.25 回転), 2.5 回転, 1.5 回転のときの位相分布を示す。図より、模擬用グローブ弁が全開の場合は、位相は 0 [deg] に集中しているが、弁開度が小さくなるにつれて位相の分布が発散する傾向にあることがわかる。

Fig.10 Phase distribution caused by decrease of valve opening.

位相の分布を定量的に評価するために、標準偏差を算出する (以後、位相の標準偏差とする)。ただし、算出される位相には、ノイズとみなすべき成分も多く含まれていると考えられる。そこで、コヒーレンス関数を用いて、系の入出力の相関性の高いデータのみを選定する。コヒーレンス関数は式(4)のように表される。

$$C_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)} \quad (4)$$

ここに、 $C_{xy}(f)$: f [Hz] におけるコヒーレンス関数, $P_{xy}(f)$: f [Hz] における入力 (x) と出力 (y) のクロススペクトル密度 [kPa^2/Hz], $P_{xx}(f)$: f [Hz] における入力 (x) のパワースペクトル密度 [kPa^2/Hz], $P_{yy}(f)$: f [Hz] における出力 (y) のパワースペクトル密度 [kPa^2/Hz].

なお、算出には Matlab のコヒーレンス関数を使用し、コヒーレンスが 0.95 以上のものを相関の高いデータとして使用する。

Fig.11 に、各弁開度における位相分布から算出した標準偏差を示す。Fig.11 から、位相の標準偏差で評価すれば、模擬用グローブ弁の開度が小さくなるほど標準偏差が上昇していることがわかる。また、差圧伝送器で測定した場合においても、Fig.9 に見たように、差圧の上昇が小さい弁開度に対しても、標準偏差に明らかな増加傾向が見ることができ。

Fig.11 Standard deviation vs. valve opening.

4. 4 まとめ

導圧管の詰まり診断に利用してきた圧力揺動の RMS に基づく手法では、グローブ弁によりメインラインに局所的な肉厚変化を模擬した場合には、差圧が大きく上昇する前に、局所的な肉厚変化の発生を診断できないことがわかった。一方、高压側圧力信号と低压側圧力信号の伝達関数の位相を評価する手法によれば、差圧で評価するよりも、メインラインの局所的な肉厚変化に対する検出感度がよいことを明らかにした。したがって、以後は位相を評価することによってメインラインの肉厚変化の診断に望むものとする。

5. 一様な肉厚変化

5. 1 実験方法

流量は $0.10[\text{m}^3/\text{min}]$ で一定とし、メインラインの圧力は各測定に対して下流側圧力取り出し口の圧力が $600[\text{kPa}]$ となるように設定する。したがって、高压側圧力と差圧は実験条件により様々に変化する。各条件における差圧を Table2 に示す。なお、本実験では外径が同一で、内径がそれぞれ異なる管路を用いて一様な肉厚変化を模擬しているため、実際には管路の内径の変化を診断対象とすることになる。

Table2 Differential pressure of each measurement condition.

Position	Differential pressure kPa						
	Inner diameter mm						
	21.2	25.0	26.2	27.2	27.6	28.4	30.7
A	63.8	29.9	23.0	21.4	19.5	16.5	14.5
B	61.7	26.1	18.9	17.5	15.4	12.8	10.6
C	56.5	23.1	15.0	13.7	11.9	8.8	6.9
D	32.1	13.3	9.6	9.0	7.1	6.4	5.6
E	18.7	7.7	6.3	5.8	5.8	4.7	4.4

5. 2 圧力揺動の位相分布に基づく評価

測定位置をパラメータとして、内径と位相の標準偏差の関係を Fig.12 に示す。Fig.12-a) は差圧伝送器で測定した結果で、Fig.12-b) は圧力センサで測定した結果である。差圧伝送器で測定した Fig.12-a) では、内径の変化に対して位相の標準偏差に変化は認められない。測定区間の距離が最も長い測定位置 A においても、内径が $30.7[\text{mm}]$ から $21.2[\text{mm}]$ まで変化しても標準偏差はほぼ一定であるため、内径の変化の診断は困難である。

Fig.12-b) は、差圧伝送器よりも測定周波数域が広い小形圧力センサによる測定結果から、位相の標準偏差を算出した結果である。小形圧力センサで測定した場合、内径の増加とともに位相の標準偏差の減少が見られる。測定位置 A において、内径が $25.0[\text{mm}]$ から $30.7[\text{mm}]$ に大きくなると、位相の標準偏差は約 $10[\text{deg}]$ の減少が認められる。しかし、Table2 からわかるように、差圧は $30.7[\text{mm}]$ から $25.0[\text{mm}]$ までに約 $15[\text{kPa}]$ 減少しており、位相の標準偏差での評価は差圧での評価よりも検出感度が劣ることがわかる。

5. 3 内径変化が影響を与える周波数域

管路の内径変化に対する評価指標の検出感度を向上させるために、評価対象としている位相の周波数特性を調査する。小形圧力センサで測定したデータを周波数解析し、位相分布を算出する。測定区間 A において、内径 $21.2[\text{mm}]$ と $30.7[\text{mm}]$ の管路について算出した位相分布を Fig.13 に示す。Fig.13 から、 $40[\text{Hz}]$ から $60[\text{Hz}]$ にかけてのみ位相の遅れが大きくなっており、これらの周波数のみを評価対象とすることで検出感度が向上することが見込まれる。

-a) Measured with differential pressure transmitter

-b) Measured with pressure sensor

Fig.12 Standard deviation with various inner diameter
(600[kPa], 0.10[m³/min]).

-a) Position A, inner diameter:21.2[mm]

-b) Position A, inner diameter:30.7[mm]

Fig.13 Phase calculated with pressure sensor.

第5.2節では、コヒーレンスによるデータ選定は行ったが、100[Hz]以下の全周波数域のデータを対象に評価したため、検出感度が低くなったと考えられる。

ここで、新たな評価手法を提案する。これまでの、位相の標準偏差を評価してきたが、標準偏差は平均値に対する評価対象の散らばり具合を示すものであるため、40[Hz]から60[Hz]にかけての特定の周波数域の位相の遅れを評価するのには適当でない。そこで、位相の変化が顕著に現れ

る40[Hz]~60[Hz]の周波数域における位相の絶対値の平均値（以後、位相の絶対値平均とする）を算出し、これを評価指標とする。

Fig.14に、測定位置をパラメータとして、管路内径と位相の絶対値平均の関係を示す。位相の標準偏差よりも検出感度が向上することがわかる。測定位置Aにおいて、内径が25.0[mm]から21.2[mm]に変化すると、差圧の減少は約15[kPa]であるのに対し、位相の絶対値平均は23[deg]減少する。位相の絶対値平均の評価指標は、差圧による評価指標よりも高い検出感度で内径変化を診断できることがわかる。

Fig.14 Averaged absolute value with various inner diameter
(600[kPa], 0.10[m³/min]).

5. 4 流量の変化に対する位相の特性

ここでは、動作点等の変化に伴う流量（流速）の変化が内径変化の診断に与える影響を調査する。低圧側圧力と流量（流速）をTable3に示す値に設定し、測定区間Aにおいて小形圧力センサを用いて実験を行う。

Table3 Experimental condition.

Low-side pressure kPa	Flow rate m³/min	Velocity m/s
600	0.07	1.95
	0.10	2.79
	0.13	3.62

Table3の条件をパラメータとして、配管内径と差圧の関係をFig.15-a)に、配管内径と位相の絶対値平均の関係をFig.15-b)に示す。なお、流量0.13[m³/min]において、内径21.2[mm]のときの差圧は112[kPa]と著しく上昇したため、このときのデータは図に記載していない。

Fig.15-a)より、流量が変化すると差圧も大きく変化することがわかる。このことから、差圧のみで管路の内径変化を診断する場合、流量の変化の影響を著しく受けるだけでなく、流量が低下すると、内径変化に対する差圧の検出感度も下がり、診断指標には適さないことがわかる。一方、位相の絶対値平均で評価した場合には、Fig.15-b)より明らかなように、流量が変化しても、差圧による評価に比して、その影響は非常に小さいことがわかる。加えて、位相の絶対値平均による評価では流量の減少に対しても検出感度が低下せず、管路の内径変化の診断には有効であるといえる。

なお、流量0.13[m³/min]（流速3.62[m/s]）に見るように、流量の大きい領域では、差圧の方が位相の絶対値平均よりも内径変化に対する検出感度が高くなる傾向にあるが、位相の絶対値平均による評価を上回る優位性には結びつかない。

Fig.15 Differential pressure and average absolute value with various flow rate(Position A).

5. 5 まとめ

任意の肉厚を正常な状態と設定し、位相の絶対値平均により評価すると、スケール付着に相当する小口径側では位相の絶対値平均が上昇し、侵食・腐食に相当する大口径側では位相の絶対値平均が減少することがわかった。位相の遅れが大きい周波数域は 40[Hz]~60[Hz]であるため、広帯域対応の小形圧力センサで測定すれば、位相の絶対値平均により、管路の様な肉厚変化を診断できると言える。

また、流速が非常に速い場合を除けば、肉厚変化に対する位相の絶対値平均による評価の検出感度は差圧による評価よりも高いだけでなく、位相の絶対値平均は流量（流速）変化の影響を受けにくいという利点がある。したがって、位相の絶対値平均による評価は、差圧による評価よりも、管路の様な肉厚変化を診断する上で優れた手法であるといえる。

6. 結言

1 台のフィールド機器を用いて管路の肉厚変化を診断する手法を導出することを目的とし、直管路を水が流れる場合について、実験調査を行った。まず、グローブ弁によってメインラインの局所的な詰まりを模擬する実験調査では、流路の変化を差圧に含まれる圧力揺動の RMS で診断するよりも、高圧側圧力信号と低圧側圧力信号の伝達関数から算出した位相の標準偏差で評価する方が有効であることを明らかにした。次に、位相の標準偏差による評価指標によって配管の様な肉厚変化を診断することの有効性について実験調査した。これによって、広帯域対応の小形圧力センサを用い、データのサンプリング周期を短くすることによって、肉厚変化を診断できることを明らかにした。しかし、差圧による診断に比較し、検出感度で劣ることがわかった。

次いで、周波数特性を詳細に調査した結果、肉厚変化に

よる影響を大きく受ける伝達関数の周波数域が 40[Hz]~60[Hz]であることを明らかにした。そこで、この周波数域のみを対象とした位相の絶対値平均を新たな評価指標として提案した。この評価指標を用いることで、差圧による評価よりも感度良く管路の肉厚変化を診断できることを明らかにした。また、位相の絶対値平均による評価は、差圧による評価に比べ、動作点等の変更によるメインラインの流量変化から受ける影響が非常に小さく、流量が減少しても検出感度が低下せず、診断指標として有効であることを明らかにした。

なお、本報では便宜上、広帯域対応の圧力センサを 2 台使用して実験調査に当たったが、将来的には、差圧伝送器の広帯域化によって、1 台のフィールド機器によって対応できると考える。

今後は、管路の摩擦抵抗、管路内表面の凹凸、管継ぎ手や流体の物性が評価指標（位相）に与える影響を調査し、診断手法の汎用性を高める予定である。

文 献

- (1) 平成 19 年版 消防白書, pp.99-100.
- (2) 福田他, 機構論, No.51-467, C, (1985), pp.1655-1662
- (3) 内田他, 機構論, No.61-584, C, (1995), pp.315-321
- (4) 近藤他, JFE 技報, No.11, (2006), pp.34-38.
- (5) 涌井他, 機構論, No.03-7, (2003), 542, pp.1-6.
- (6) "FOUNDATION Fieldbus Technical Overview", FD-043, (2003).
- (7) 元吉, フィールドバス入門, (2000), pp.1-215.
- (8) 柴野他, 機構論, No.05-15, (2005), CD-ROM, No.110, pp.1-6.
- (9) 上原他, 機構論, Vol.6, (2007), pp.12-16.
- (10) 石川他, 新差圧・圧力伝送器 Dpharp EIX シリーズ, 横河技報, Vol.48, No.1, (2004), pp.13-18.