管内音圧変動を利用した管長オンライン計測[†]

田中正吾*・岡本昌幸*

On-Line Measurement of Pipe Length Using Fluctuation of Acoustic Pressure in Pipe

Shogo TANAKA* and Masayuki OKAMOTO*

In the field of measurement and control, there are many applications where indirect measurement of pipe length plays an important role. This paper deals with the on-line measurement of the position of a sand surface in casing pipe related to the improvement of weak foundation. In the construction, how fast does the sand surface sink influences the form of the sand pillar. If the sinking velocity of the sand surface is measured on-line and with high accuracy, not only precise quality control but also smooth construction and consequently saving of much energy are achieved. The measurement can be reduced to that of the length of the pipe terminated with a metallic cover and pressurized sand surface.

For the length measurement, light and sound waves are recollected immediately as a medium, but it is difficult to use light wave because of much vapor produced by pressurization and decompression in the pipe. This paper presents, using sound wave, a method which enables the pipe length to be measured accurately and low-costly. The method is based on the pattern matching between the acoustic pressure in the pipe and a linear combination of the elementary and its integral frequencies of stationary waves.

Key Words: pipe length, on-line measurement, acoustic sensor, sound wave, stationary wave

1. 緒 言

計測・制御の分野では、水道・ガス等の配管関係を始めとし、管の長さを間接測定することが重要な役割を果たす場合がしばしば見受けられる。著者らは、先に、このような観点から、管の長さ計測に関するひとつの応用例として、軟弱地盤改良工事におけるケーシングパイプ内の砂面位置のオンライン計測を考えた¹⁾。つまり建設土木工事においては、陸上、海上を問わず、大規模工事の際、軟弱地盤を改良するため、多くの砂柱が打ち込まれる。例えば、先の関西新国際空港の場合、百万本もの極めて多くの砂柱が洪積層の軟弱地盤層に打ち込まれた。具体的には、直径40~50cm、長さが50~80m位の鋼管に土砂を投入し、これにコンプレッサーによる加圧・減圧を繰り返しつつ鋼管を徐々に引き抜くことにより、円柱状の砂柱を軟弱地盤層に加圧成形する訳である。

このような工事では、砂面がどのような速度で沈下していくかが砂柱の形成に大きな影響を与える。したがって、この沈下速度を高精度にオンライン計測できれば、品質的確な管理だけでなく、工事を円滑に進めることができ、工期の短

縮及びエネルギーの多大なる節約を図ることができる。この沈下速度を計測するため、これまでは錘を下端に取り付けたワイヤを鋼管上部から吊るし、ワイヤの巻下げ長さで砂面位置を検出する方法が採用されていたが、錘が砂面の中に埋まってしまうたり、あるいはワイヤが切れるなどして、安定で高精度な計測が困難であった。このような観点から、非接触で高精度なオンライン砂面位置検出法が強く望まれて来た。

非接触測定法としては、光や音波を利用することが直ちに想起されるが、この測定対象では閉じた鋼管内で加圧・減圧が繰り返されるため、鋼管内に多量の水蒸気が発生し、そのため光波による計測が困難である。従って、音波の使用が考えられることになる。本計測問題に適用できそうな方式としては、小山・渡辺ら²⁾により提案された鋼管内異常モニタリング手法があるが、この手法は、M系列信号を入射したときに得られる反射波を周波数分析することにより、管の詰まりや穴の位置を検出する方法である。もちろん、この手法は管の長さ計測にも適用できるが、対象が本来、詰まりや異常穴の位置計測に主眼が置かれているため、管(つまり気柱)の長さオンライン計測には不向きである。さらに、工事が騒音や振動などの悪環境の下で行われるので、M系列信号を入れることが装置的に困難であるなどの欠点もある。一方、掛橋³⁾らにより最近、電磁波反射波解析により気柱の長さを計測する方式³⁾が提案されたが、機能回復のため、しばしば電磁波

[†] 第35回計測自動制御学会学術講演会で発表(1996・7)

* 山口大学工学部 宇部市常盤台 2557

* Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube
(Received February 14, 1996)
(Revised September 17, 1996)

の励振器に付着した砂を海水で洗浄しなければならない煩わしさが生じる。

このようなことから著者らは先に、アクチュエータを持たず、音響センサだけで安価かつ稼働率の高いオンライン計測システムを構成すべく、閉じた鋼管内に生じる音圧変動を線形ダイナミクスモデルで表し、この音圧を音響センサで抽出、適応型カルマンフィルタを適用するオンライン砂面位置自動計測システムを提案した訳である。この手法は鋼管内部への伝播騒音を積極的に活用する方式であり、わずかな音圧データで鋼管の長さ、つまり気柱の長さが高速・高精度に計測できた。しかしながら、カルマンフィルタを適用するときのシステム雑音の分散の与え方については、まだ完全に定式化されておらず、与え方によっては異なった気柱の長さに収束するなどの問題点が残されていた。

そこで本稿では、時間の経過に伴い鋼管内に速やかに定在波が生じることを念頭に、定在波の基本振動および倍振動の一次結合で鋼管内音圧を表わす方式により、これまでの方式^{1) 2) 3)}とは異なり、アクチュエータ、コスト、パラメータ設定などの問題点を解消する実用的な高精度鋼管長(つまり気柱の長さ) オンライン自動計測システムを提案する。もちろん本稿で使用する音響センサは、管内気柱の長さに応じて定まる可聴周波数帯域の音波が抽出できるものであればよく、超音波センサの使用は考えない。ちなみに、本稿で超音波センサを使用しない理由は、超音波を使用すると砂面までの音波伝播時間により砂面位置計測を行う方式となり、(空気中の超音波減衰率が大きい)実現が困難になるからである。

2. 鋼管に生ずる定在波について

軟弱地盤改良工事におけるように、コンプレッサーによる加圧ごとに鋼管内の砂面がゆっくり下降する場合は、鋼管内音圧変動を用いて鋼管の長さ(実際は、気柱の長さ)計測を行うとき、計測中の気柱の長さは一定であると仮定して差し支えない。これは、加圧周期に比べ音圧変動周期が極めて短いからである。このとき、両端が閉じた長さ L [m] の鋼管の内部に生じる定在波は両端が節 (node) の定在波となり、基本波(基本振動のこと)の波長は $2L$ [m]、他(倍振動のこと)はこれの整数の逆数倍である (Fig. 1 参照)。したがって、これらの定在波の周波数は良く知られているように

$$\omega_i \triangleq 2\pi i V(p) / (2L) \text{ [rad/s] ; } (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

で与えられる⁴⁾。なお、周波数は簡潔さのため角周波数で表わしている。ここに、 $V(p)$ は鋼管内部の音速であり、鋼管内温度を $p^\circ\text{C}$ とすれば、

$$V(p) = 331.5 + 0.61 p \text{ [m/s]} \quad (2)$$

で与えられる。工事に際しては、鋼管の上端は金属蓋により、また下端は加圧された砂面となっているため、砂面までの気柱においては両端が閉じた鋼管のような定在波が生じる(参考のため、砂柱形成工事では、加圧時、6~7気圧ぐらいの極めて高い圧力が砂面にかかる)。したがって、気柱両端

Fig. 1 The stationary waves in a closed straight pipe

で音圧が最大となり、音響センサを1個、鋼管上端部に取り付けるだけで、工事に何ら影響を与えることなく、鋼管内音圧変動を高いSN比で採取できる。

したがって、原理的には、この採取した音圧信号を周波数分析し、これに含まれる定在波成分を見出すことにより、(1)式に基づき気柱の長さ計測、つまりは砂面までの距離計測を行うことができる。本論文では、以下提案する手法は他の鋼管長計測にも応用できるため、混乱を招かない箇所では一般的に鋼管長計測と呼ぶこともある。

3. 鋼管の長さオンライン計測

砂柱形成に当たっては、加振機によるハイレベルの外部騒音が鋼管内部に伝播するため、鋼管内部には鋼管の長さに応じた定在波が生じることになる。したがって、この音圧変動データを採取し周波数分析することにより、原理的には、鋼管上端から砂面位置までの長さに相当する鋼管長計測が可能となる。しかしながら、いまオンライン計測を念頭においていることから、本論文では、FFT(高速フーリエ変換)^{5) 6)}などによる汎用的な周波数分析手法は用いず、(1)式の関係を利用した効率的な鋼管長(あるいは気柱の長さ)オンライン計測手法を提案する。以下、鋼管の両端は閉じているとして話を進めるが、一方あるいは他方が開 (open) の場合も本手法の考え方はもちろん有効である。

いま、基本波(基本振動)の周波数 ω_0 [rad/s] の N 倍までの倍振動波形を用いて音圧を近似することを考える。つまり、角周波数 $\omega_i = i \times \omega_0$ ($1 \leq i \leq N$) の正弦及び余弦関数

$$\{\sin \omega_i t, \cos \omega_i t; 1 \leq i \leq N\} \quad (3)$$

の一次結合により音圧変動 $s(t)$ を表すことを考える。したがって、このときの最適一次結合(展開)係数 c_i^*, d_i^* ($1 \leq i \leq N$) は次式で与えられる。

$$\|s(t) - \sum_{i=1}^N (c_i \sin \omega_i t + d_i \cos \omega_i t)\|^2 \rightarrow \min_{\{c_i, d_i\}} \quad (4)$$

但し、 $\|\cdot\|^2$ はヒルベルト空間におけるノルム二乗を表し、またこれを定義する内積は次のように定義される。

Fig. 2 Geometrical explanation of $\theta(L)$

$$(f, g) = \int_T f(t)g(t) dt \quad (5)$$

したがって、

$$\|f\|^2 = \int_T f(t)^2 dt \quad (6)$$

ここに、 T は利用する音圧データのウインドウである。(4)式の最適展開係数 c_i^*, d_i^* ($1 \leq i \leq N$)は、(4)式左辺を係数 c_i, d_i ($1 \leq i \leq N$)について偏微分し、これらをすべてゼロとおくことにより線形代数方程式の解として容易に得られるが(詳細は略)、このときの左辺の最小値は次式で与えられる⁷⁾。

$$\delta(L)^2 = \frac{G(f_1, f_2, \dots, f_{2N}, s)}{G(f_1, f_2, \dots, f_{2N})} \quad (7)$$

ここで、 f_i ($1 \leq i \leq 2N$)はそれぞれ $\{\sin \omega_i t, \cos \omega_i t; 1 \leq i \leq N\}$ で定義される関数系であり、 $G(\cdot)$ はグラム行列式(Gramian)を表す。例えば、 $G(f_1, f_2, \dots, f_{2N})$ は (i, j) 要素が (f_i, f_j) で定義される $2N \times 2N$ の行列(グラム行列という)の行列式である。よって、鋼管の長さ L としたとき、この鋼管長に対応する基本振動の周波数及びその N 倍までの周波数の正弦及び余弦関数で音圧変動 $s(t)$ を最適マッチングしたときの最小二乗誤差は(7)式で与えられ、しかも、このときのマッチングの良否は、音圧 $s(t)$ の大きさ、つまり $s(t)$ のノルムで規格化した次式で定義される。

$$\theta(L) = \sin^{-1} \{ \delta(L) / \|s\| \} \quad (8)$$

この $\theta(L)$ は、幾何学的に言えば、実際の音圧変動 $s(t)$ が基底関数 $f_i(t)$ ($1 \leq i \leq 2N$)で張られる部分空間 S となす角度(Fig. 2参照)であり、これが小さいほど、音圧 $s(t)$ は基底関数 $f_i(t)$ ($1 \leq i \leq 2N$)で表しやすくなり、このときの該当する長さ L が求める鋼管の長さとなる。いま対象としている軟弱地盤改良工事で言えば、ケーシングパイプ内の砂面までの距離である。(8)式において $\delta(L)$ を $\|s\|$ で規格化した理由は、 $s(t)$ が小さい場合はマッチングが良好でなくても $\delta(L)$ が小になることがあり、 $\delta(L)$ の値だけでは必ずしも鋼管長計測の決め手にはならないからである。

このようにして、任意のデータウインドウ T に対して、鋼管長を計測するための評価関数となるマッチング角が定義されたが、(7)式からわかるように、行列式をとるグラム行列の次数が $2N$ になるため、 N が大きくなれば必然的に行列式の計算に多大の計算時間を要し、かつ、それだけでなく計算

誤差も累積する。これを防ぐ、つまり短時間で計算、かつ計算誤差が現れないようにするには、データウインドウの取り方を工夫すればよい。これには、データウインドウとして、現時刻より基本振動の周期の整数倍の時間区間を採用すればよい。これは、このとき

$$f_i^o = f_i / \|f_i\| = \frac{1}{\sqrt{D/2}} f_i \quad (1 \leq i \leq 2N) \quad (9)$$

D : ウインドウ T の幅

なる基底関数を導入すれば、このデータウインドウの下で、これらの関数は

$$(f_i^o, f_j^o) = \delta_{ij} \quad (1 \leq i, j \leq 2N) \quad (10)$$

を満たす正規直交関数系となり、 $\delta(L)^2$ は関数空間論により、(7)式を展開するまでもなく次式で与えられるからである。

$$\begin{aligned} \delta(L)^2 &= \|s\|^2 - \sum_{i=1}^{2N} (s, f_i^o)^2 \\ &= \|s\|^2 - (2/D) \sum_{i=1}^{2N} (s, f_i)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

なお、(10)式の δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号(Kronecker's delta)である。このようにして、近似誤差のノルム2乗は、直交射影の原理により、音圧のノルム2乗から直交射影成分のノルム2乗を差し引いたものとなり、この式を利用することにより鋼管長計測のための計算時間が大幅に削減できる。

ところで鋼管内部の音圧変動 $s(t)$ であるが、計測に際しては音響センサを介して音圧データが計算機にサンプリング周期 ΔT secごとに収録されるようになっているので、最小二乗誤差 $\delta(L)^2$ の計算に際しては、(7)式あるいは(11)式はそのままの形で使えない。これは、例えば(7)式では (f_i, f_j) ($1 \leq i, j \leq 2N$)は連続関数形で計算できても、(7)式分子のグラム行列の (f_i, s) ($1 \leq i \leq 2N$)成分はサンプリング周期ごとの値でしか計算できないからである。このことは、(11)式の $\|s\|^2$ や $(s, f_i)^2$ ($1 \leq i \leq 2N$)の計算においても同様である。そのため、連続時間ではなくサンプリング時刻ごとの値でのマッチングを考える必要があり、いま内積として

$$(f_i, f_j)^* = \sum_{k \in K} f_i(k\Delta T) f_j(k\Delta T) \Delta T \quad (12)$$

あるいは、上式において ΔT を除いた

$$(f_i, f_j)^{\#} = \sum_{k \in K} f_i(k\Delta T) f_j(k\Delta T) \quad (13)$$

を考える必要がある。なお、 $k \in K$ はデータウインドウ中のすべてのサンプリング時刻についての総和をとることを意味する。また ΔT を除去したのは、(8)式の評価関数に何ら影響を与えないことを考慮したからである。これによって、(8)式はサンプリング時刻上での音圧情報を用いたときの鋼管長計測のための評価関数としての意味を持ち続けるが、(7)式の計算時間を削減したことにはならない。そのため、(11)式を導いたのと同じ発想により、基本振動の周期の整数倍の時

間区間をデータウインドウにとり、これを定義域にした内積(12)式、あるいは ΔT を除いた(13)式の内積を考えることにより、サンプリング周期 ΔT が十分小であるという仮定の下で、評価関数(8)式を算出するための(11)式を(近似的にではあるが)短時間に計算できることになる。

以上のようにして、気柱の長さ L を変数にしてマッチング角(8)式を求め、これを最小にする値を探索すれば、気柱の長さ、つまり砂面までの距離が測れる。緒言でも述べたように、軟弱地盤改良工事では砂面位置は加圧により1秒間に10~25cmぐらいの割合でしか沈下しないので、砂面位置は前回の計測時に得た砂面位置を基に容易に推測できるわずかな幅の値の範囲に含まれる。したがって、気柱の長さ L はこの範囲で3回程度変え、あとは二次内挿法により最小値を与える気柱の長さを求めればよい。したがって、計算時間はほとんど要さずオンライン計測に適している。なお砂面位置の予測に際しては、過去数秒間の計測値を $L_i(1 \leq i \leq M)$ 、これらが求めた時刻を $t_i(1 \leq i \leq M)$ (但し、 $t_1 < t_2 < \dots < t_M$)とすれば、時刻 $t(>t_M)$ における砂面までの距離は、数秒間は砂面位置が滑らかに沈下しているとみなされるので、一次近似では

$$\hat{L}_1(t) = (t \ 1) \left[\sum_{i=1}^M \begin{pmatrix} t_i \\ 1 \end{pmatrix} (t_i \ 1) \right]^{-1} \times \sum_{i=1}^M \begin{pmatrix} t_i \\ 1 \end{pmatrix} L_i \quad (14)$$

二次近似では

$$\hat{L}_2(t) = (t^2 \ t \ 1) \left[\sum_{i=1}^M \begin{pmatrix} t_i^2 \\ t_i \\ 1 \end{pmatrix} (t_i^2 \ t_i \ 1) \right]^{-1} \times \sum_{i=1}^M \begin{pmatrix} t_i^2 \\ t_i \\ 1 \end{pmatrix} L_i \quad (15)$$

と表される。したがって、短時間では(14)式の $\hat{L}_1(t)$ が、また長めの時間では(15)式の $\hat{L}_2(t)$ が有効となるが、いずれを用いるにせよ、オンライン計測に際しては、これらの値 $\hat{L}(t)$ 及びこれらの値の前後の適当な値 $\hat{L}^-(t)$ 、 $\hat{L}^+(t)$ の計3つの L の値に対し最適マッチング角(8)式を求め、二次内挿法を適用すればよい。

4. 実験結果及び検討

軟弱地盤改良工事では、土中に垂直に打ち込んだ鋼管に土砂を投入し、その後、鋼管上部を加振機により振動を与えつつ、コンプレッサにより加圧、減圧を繰り返す。したがって、間欠的に大きな騒音が鋼管内部に伝播し、これが鋼管上端に設置した音響センサに音圧変動として観測される。現場での実験が当面困難なため、本研究では、長さ12.0m、直径21.63cm、厚さ4.5mmの両端が閉じた鋼管を横に寝せ、一端に音響センサを取り付け実験を行なった。また鋼管内部へ

Fig. 3 Outline of the experiment

の伝播音を、音響センサを取り付けた側の管端に近い箇所に金物で衝撃を与えたときの伝播音で模擬した。ここで用いた音響センサはコンデンサ型マイクロフォンであり、このときの音圧変動をサンプリング周期 $\Delta T=0.4\text{ms}$ で収録した。このときの実験概略図をFig. 3に示す。また、衝撃を与えたときの管内音響センサに観測される音圧変動をFig. 4に示す。但し、このときの鋼管内部の温度、湿度はそれぞれ 23.5°C 及び68%であった。Fig. 4より、時間の経過に伴い高周波数成分が減衰することに加え、定在波成分が併せて観測される様子がわかる。

本実験で得られた音圧データに対し、本論文の方式により、鋼管長に対するマッチング角の変化を L を変えて厳密に図示したのがFig. 5である。ただし、 $N=30$ としている。なお、図では、衝撃を入れた瞬間、0.25sec後、0.5sec後からの3つのデータウインドウの場合についてそれぞれマッチング角の変化を描いている。なおデータウインドウは、当該時刻から基本周波数の周期長の4倍の区間としている。共に、鋼管長が12mの近傍で最小値をもち、鋼管長が正しく計測されていることがわかる。さらに、いずれの場合も最小値の位置はほとんど変化しないが、衝撃を入れてからの時間の経過が大きいほど、最小値の付近が急峻になり最小値を与える鋼管長を求めやすいことがわかる。なお、基本振動数の3倍までの倍振動を用いても、凹凸がなくなることを除けば、ほとんど同じような結果が得られる。このときの鋼管長に対するマッチング角の変化の図をFig. 6に示す。この図より、0.25sec後および0.5sec後のデータウインドウについては最小値を与える鋼管長は $N=30$ のときとほとんど変わらないが、0secよりのデータウインドウについては高周波数の影響が強く、若干短めの鋼管長が計測されている。このことから、 N としてはできるだけ大きいもの(本論文のように $N=30$)を採用した方がよいことがわかる。Fig. 5の実験を5回行い、測定誤差の平均値を算出すると0sec、0.25sec、0.5sec秒後のデータウインドウの順にそれぞれ0.23%、0.36%、0.33%となり、良好な測定結果が得られていることがわかる。

本稿では、実験の結果 N は30ぐらいが適切との結果を得たが、本提案システムを実際に適用する場合には、工事に際して使用する機械のタイプなどによって変わる可能性があり、そのため適用に際しては、事前にこれまでの錘方式と比較検

Fig. 4 Fluctuation of the acoustic pressure in the steel pipe

Fig. 5 Matching angle versus pipe length (N=30)

Fig. 6 Matching angle versus pipe length (N=3)

Fig. 7 Matching angle versus pipe length under complicated noise environment (N=30)

討しつつ N の値を適切に決める必要がある。

次に参考のため、いま、衝撃を入れた瞬間、0.25sec 後、0.5sec 後のそれぞれ 3 つのデータウインドウ中の音圧データを加えた新たな音圧変動データに対し、基本振動数の 30 倍

までの倍振動を考えたときのマッチング角の変化を描いたものを Fig. 7 に示す。この図からも、最小値は 12m のごく近傍に求められ、単一衝撃音だけでなく、複合衝撃音が加わり、これらが重畳した音圧として観測される場合にも良好な鋼管長計測が可能であることがうかがわれる。このときの 5 回の実験による測定誤差率の平均値は 0.21% であった。

なお、実際の現場で生じるとと思われる管内音圧変動は、基本的には、(管を引き抜くため) バイプロモータにより 15Hz 程度の機械的な力を (カム機構により) 管に加えたり、あるいはコンプレッサーによる加圧・減圧時に開閉用の金属蓋が管壁にぶつかったりするときなどの衝撃により発生するので、管内音圧変動は前述のように時間をシフトした幾つかのインパルス応答の一次結合で表現できるものと思われる。もちろん、工事の際、管外に騒音が生じるが、これは空気と管材質の音響インピーダンスが大きく異なるため管内への透過は極めて小さく無視できる。以上のような理由により、提案手法は実際的にも有効ではないかと期待される。今後は、できるだけ早く軟弱地盤改良工事現場にて実データを収集し、測定精度等についてさらに詳細な検討を行いたい。

最後に、実際の工事におけるオンライン性をみるため、鋼管長 L を一回だけ与えて (11) 式に基づいてマッチング角 (8) 式を算出する時間を求めると、EWS(東芝 Sun, AS4080) ではほぼ 0.1 秒となり、3 回の計算でもわずか 0.3 秒であり、このため DSP (digital signal processor) を上手に使いえば、普通の計算機でも十分実用に供する計測方式となり得るがわかる。なお、二次内挿法により求めた解は L を多数変えて厳密に求めた値とあまり変わらず、この計算法でも測定値は真の鋼管長に対し測定誤差率は 0.6% 程度に抑えられることがわかった。

5. 結 言

本論文では、軟弱地盤改良のための砂柱形成工事における鋼管内砂面の連続的位置検出を念頭に、音響センサを用い、鋼管の長さオンライン自動計測を考えた。方式としては、鋼管内部に生じる音圧変動を、鋼管長に応じて定まる定在波の基本振動および適当な数の倍振動波形の一次結合でマッチングする方式により管長の高速・高精度計測を行うことを考えた。

本論文では両端が閉じた鋼管に対する鋼管長自動計測システムを考えたが、この考え方はもちろん、一端あるいは両端が開の鋼管の長さ計測の場合にも、管の長さと定在波の基本周波数との関係を変えれば、直ちに適用可能である。本計測システムの他の応用例としては、管の詰まりや穴の箇所などの、いわゆる異常箇所の特定制も考えられるが、これに関してはこれまでの方式との得失を考え研究を進めていきたい。また、近いうちに機会をみつけ、実際の工事現場で本計測システムの有効性を確認したい。

最後に、実験等でご協力戴いたエムイーシー (MEC) エンジニアリング・サービス (株) の蒲池 薫氏および卒業論文の

一環として本研究にご協力を戴いた平成7年度本学卒論生米田 圭君に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 田中・山崎：鋼管内音圧変動を利用した管の長さオンライン自動計測について，計測自動制御学会論文集，**30**-11, 1317/1324 (1994)
- 2) 小山・渡辺：音響法によるバイブラインモニタリング，計測自動制御学会論文集，**29**-3, 295/301 (1993)
- 3) 掛橋隆晴：電波式砂面位置検出装置，作業船，218, 16/22 (1995)
- 4) 鹿児島誠一：振動・波動入門，サイエンス社 (1992)
- 5) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店 (1988)
- 6) 南 茂夫編：科学計測のための波形データ処理，CQ 出版社 (1988)
- 7) D.G.Luenberger: Optimization by Vector Space Methods, John Wiley & Sons, Inc. (1968)
- 8) 田中正吾：計測システム工学，朝倉書店 (1994)

[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。

岡 本 昌 幸 (学生会員)

1994 年，山口大学工学部電子工学科卒業。現在，同大学大学院工学研究科システム工学専攻博士課程在学。音響センサを用いた鋼管長オンライン計測に関する研究に従事。