

前方横切り移動物体の速度測定

鈴木 守人・茂木 良平

A study for measuring of velocity at which an object traverses forward

Morito SUZUKI and Ryohei MOTEGI

(平成20年11月28日受理)

We studied a method for measuring of velocity at which an object traverses forward and a technique for judgment of movement direction. The velocity was measured by the number of reflecting waves from an object in the sound field which was built forward, and we judge the movement direction by order in which two sensors received the reflecting waves. These sensors were placed at intervals of 3.3cm or 6.0cm. The distance between sensors and an object were 0.7m, 1.0m or 1.3m. As a result, the velocity could be measured with some error. It seemed that the fluctuation of the reflection wave caused the error. And movement direction could be judged in any condition.

1. 緒言

1-1. 背景

移動物体の速度を測定する方法は、二点での通過時間を測定する方法が一般的である。また、二点で測定するのが困難な状況での測定法として、接近してくる物体からのドップラーシフトを測定するドップラー法などがある¹⁾²⁾。同様の方式ではFMCWによる測速度方式もある³⁾。しかし、前方を横切って移動する物体の速度はドップラー法では測定できない。一点で前方を横切る物体の移動速度を測定する方法としては、画像処理を利用する方法がある⁴⁾。ただし、画像処理法は装置の複雑さや規模の大きさが伴う。

本研究では、比較的規模の小さい装置でありながら、超音波を用いて一点から前方を横切る速度を測定する方法を研究する。また、今までの装置では前方を横切る物体が左右どちらから来ているのか分からなかった⁵⁾。そこで、移動方向の判定をできるようにする。

1-2. 研究内容

本研究は、画像装置などよりも容易な、超音波を利用して一点で前方横切り速度を測定する方法の確立を目的とする。速度測定は、超音波パルスを一定周期で繰り返し発信し、移動物体からの反射波の検

知回数を計数することにより行う。移動方向判定は、反射超音波の受信機を二つ用い左右センサの受信の時間差を利用することで行う。

今回はまず、移動方向判定装置を製作し、前任者が開発した速度測定装置と組み合わせて、実験を行った。まず、移動方向判定のために左右センサの配置条件を検討し、次に、実験条件を変更し移動方向の判定が正しく行われていることを確認し、そして、速度測定装置と組み合わせて精度や不確かさについて分析し、課題を考察した。

2. 測定原理

ここでは、本研究における前方横切り物体の移動速度の測定原理および移動方向判定の方式について述べる。

観測点に設置された超音波送受信機から前方に向けて超音波を放射し、その反射波を受信する。超音波は連続波ではなくパルス波で一定周期で繰り返し発信し、前方に音場を形成する。音場の中を移動物体が通過するラインを予め設定しておき、音場中の通過距離（以後、検知領域の幅という。）を測定しておく。その音場を移動物体が横切る際の反射パルスの検知回数を測定し、そして、反射パルスの検知回数から移動物体の通過時間を求め、予め測定しておいた検知領域の幅をこの通過時間で除すること

で、移動速度を求める。図1に本方式のイメージ図を示す。

製作した超音波送受信機は、周波数43 [kHz] の超音波をパルス幅1 [ms] で23 [ms] の周期で発信している。図2に発信超音波パルスの様子を示す。

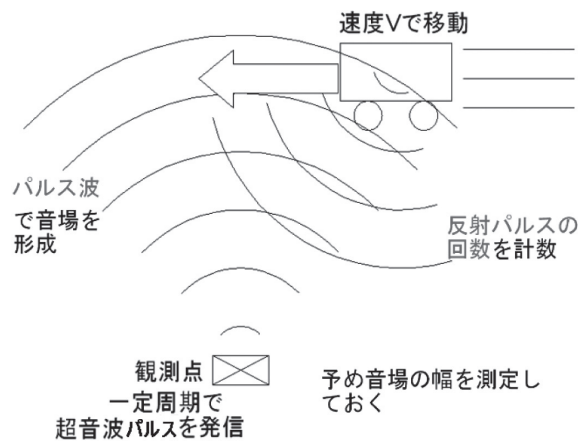


図1 本方式のイメージ図

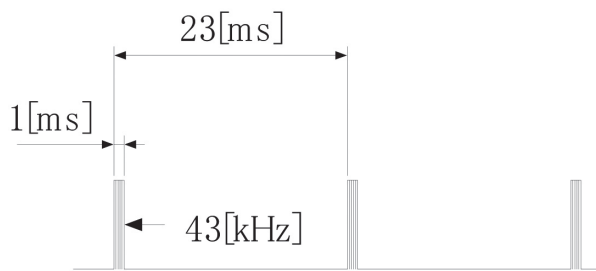


図2 発信超音波パルス

2-1. 速度の測定原理

2-1-1. 形成される音場

実験装置は受信センサを二つ用いており、それぞれの受信波を加算することで形成される音場は、図3に示すように複峰音場が形成される。また、音場形状は送信される超音波の周波数と二つの受信センサ間距離によって変化する。

移動物体から反射してくる超音波パルスは受信機から検知装置に送られ、その振幅が検知装置で予め定められた閾値を超えている場合、検知装置は反射パルスを検知したとして計数される。また、反射パルスが検知される音場領域を検知領域と呼ぶ。観測点から移動物体が横切る位置までの距離をdとし、その距離での検知領域の幅をLとする。検知領域の幅は音場のそれぞれの山の幅の合計 $\sum L_i$ として求められる。

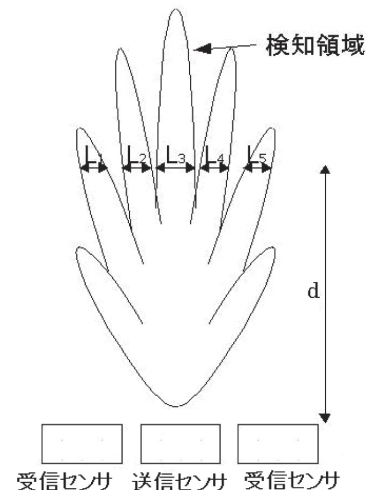


図3 形成される音場

2-1-2. 理論式

移動物体の速度が音波の速度に対して無視できるほどに小さい場合は、反射パルスの周期はほぼ一定なので一種のクロックパルスと考えられる。パルス波の繰り返し送信周期をT、反射波の検知回数をN、検知領域の幅をLとすると移動物体が検知領域の幅Lを通過するのに要する時間は、パルス波の繰り返し周期Tと検知回数Nを乗じた値となる。

$$\begin{aligned} \text{通過に要する時間} &= \text{パルス送信周期} \times \text{検知回数} \\ &= T \times N \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

複峰音場においては形成される各検知領域に順に添え字を付け、その検知領域の幅・検知回数にも同様に添え字を付け、L、Nは各検知領域での値の合計値を使用する。

$$\begin{aligned} L &= \sum_i L_i \\ N &= \sum_i N_i \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

そして移動物体が横切る速度Vは検知領域の幅Lを通過に要する時間(T×N)で除して求められ、次式のようになる。

$$\begin{aligned} \text{移動速度} &= \frac{\text{検知領域の幅}}{\text{通過に要する時間}} \\ V &= \frac{L}{T \times N} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

2-2. 移動方向の判定

受信センサを二つ用いることで図4に示すとおり左右のセンサには時間差が生じる。この時間差を利用し、順序判定回路を用いることで左右判定を行う。

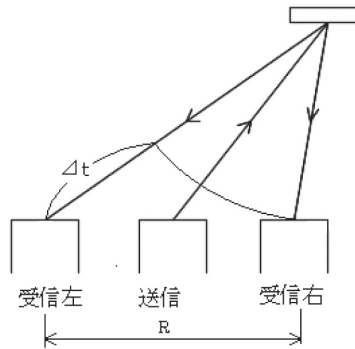


図4 左右判定原理の概要図

3. 実験装置

3-1. 実験装置の概要

超音波送受信機は、市販されている超音波測距計をもとにして、一部回路を追加したものを製作した。超音波送受信機的主要仕様は、発信回路については前章2.1節に述べたもので、受信回路は40 [dB] の増幅器と約0.01 [m] の刻みの距離計が内蔵されている。超音波センサは、市販の40 [kHz] のものを用いた。開口径はφ12 [mm] である。

検知装置は、二つの受信センサの反射波を合成する加算回路、反射波の有無を判別するパルス成形回路（閾値回路）と、検知反射パルス数を計数するカウンタ回路で構成されており、閾値は別に用意した直流電源電圧の出力を調整することで任意に設定できる。移動物体には、電車の模型に反射体としてアルミアングル（30 [mm] × 30 [mm] × 700 [mm]）を固定したものを使用した。実験装置の概要を図5に示す。

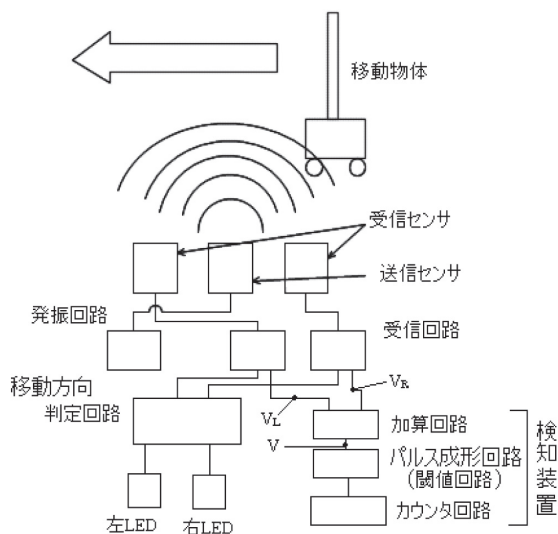


図5 実験装置概要図

3-2. 移動方向判定回路

図6に移動方向判定回路、図7にそのタイムチャートを示す。

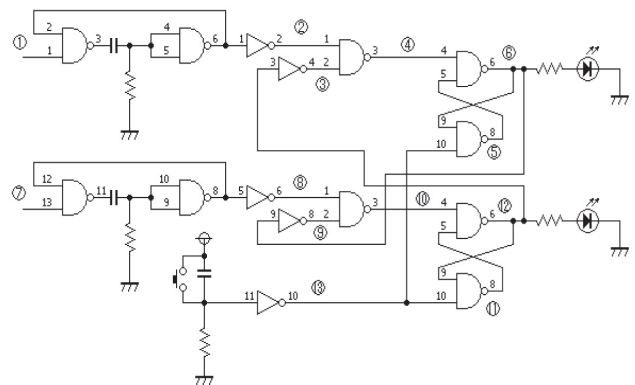


図6 移動方向判定回路

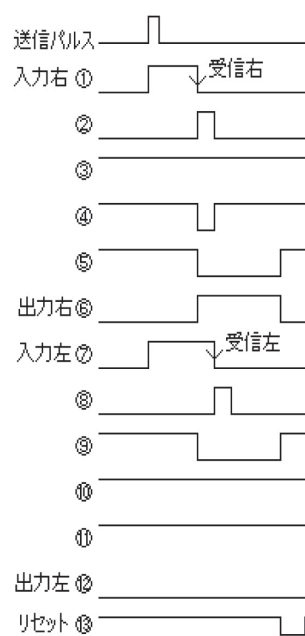


図7 タイムチャート

入力信号は超音波の送信時に立ち上がり、受信時に立ち下がる。そこで、移動方向判定の回路はNANDを用いた単安定マルチバイブレータと順序判定回路から構成されるものを作製した。

入力信号①、⑦がHからLになると、単安定マルチバイブレータにより②、⑧にパルスが出力される。ここでは②より⑧が遅く出る例とした。出力は⑥、⑫は初めLとなっており、③、⑨はHとなっている。図7より、②

が立ち上がることで④がLになる。最終段のNANDによる順序判定回路はネガティブエッジ型のRSフリップフロップとなっている。したがって、④または⑩にネガティブエッジが入力すると、出力⑥または⑫がHになり、ランプが点灯する。そのため、右の出力⑥がHになりLEDが点灯する。左側は受信が右よりも遅いため⑧が②よりも遅く出ている。⑥がHになることで⑨がLになる。そのため、⑧がHになっても⑩がLにならないので、左の出力⑫はHになることはない。リセットである⑬がLになることで⑤、⑪がHになる。この時④がHなので出力⑥はLになる。

4. 実験結果

4.1. 受信センサ間距離と移動方向判定

移動方向判定を行うに当たって受信センサ間の距離（図4中のR）を決定する必要がある。この距離が近いと移動方向判定が確実にない可能性があった。そこで受信センサ間距離をどこまで近づけられるかを調査した。

受信センサ間距離を最短の3.3cmと6.0cmに設定し、距離 $d=1.0\text{m}$ で各センサの受信電圧の測定と移動方向の判定を行った。各センサ間距離における左右センサの受信電圧を図8に示す。

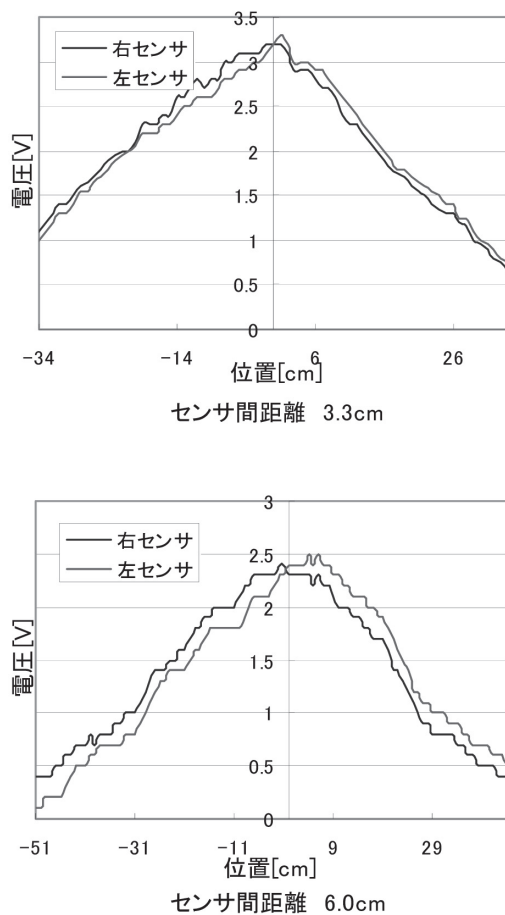


図8 左右の受信センサの感度差

移動方向の判定はどちらの場合でも確実に検知することができた。よって、センサ間距離が最短の3.3cmでも移動方向判定は確実に行われることがわかった。また、左右それぞれの反射超音波振幅には揺れが見られた。その揺れにより左右の感度差が逆転することが考えられたが、それぞれの揺れは同タイミングで上下しており、その感度差が逆転することはないと考えられる。

受信センサ間距離が近くても移動方向判定を行えることがわかったが、受信センサ間距離が近いと形成される音場の山の数が少なくなる。この山の数が少ないと速度測定の誤差が大きくなるため、以降の測定では前任の研究者の例に従い、5～6峰となる音場を形成するため、センサ間距離を6.0cmとして実験を行った。

受信センサ間距離を6.0cmにして、測定距離 d を0.7, 1.0, 1.3mに変えて移動方向の判定を行ったところ、すべての条件で移動方向判定は確実に行えた。またそれぞれの場合での中心に対しての検知位置を測定したところ、測定距離 $d=0.7\text{m}$ では約30cm, 1.0mでは約40cm, 1.3mでは約50cmの位置で検知していた。

4.2. 参照速度測定結果

超音波による測定の直前に、まず基準となる移動物体の移動速度の測定を行った。移動物体を区間1[m]通過させ、その通過時間をストップウォッチで測定し、参照速度を算出した。移動体である電車は電池による駆動であるため消耗が考えられた。そのため、各測定の合間に10回測定を行い、参照速度を確認した。表1にその結果を示す。

表1 参照速度測定結果

参照速度測定結果[m/s]	平均値[m/s]	標準偏差[m/s]	標準偏差[%]
0.291	0.280	0.284	0.0031
0.286	0.282		
0.280	0.285		
0.282	0.285		
0.282	0.282		
参照速度測定結果[m/s]	平均値[m/s]	標準偏差[m/s]	標準偏差[%]
0.294	0.294	0.292	0.0031
0.286	0.294		
0.294	0.294		
0.286	0.291		
0.294	0.294		
参照速度測定結果[m/s]	平均値[m/s]	標準偏差[m/s]	標準偏差[%]
0.285	0.287	0.288	0.0031
0.282	0.288		
0.293	0.288		
0.288	0.286		
0.288	0.291		

4.3. 検知領域の幅の測定結果

検知領域の幅 L を測定するために閾値を決定する必要がある。そのために、まず反射超音波の振幅分布の測定を行った。観測点から前方 d の移動物体通過ライン上の各位置に移動物体を設置し、各位置での移動物体からの反射超音波の振幅分布を測定した。この反射超音波振幅分布より、適切な検知閾値を決定する。

測定は移動物体までの距離 d を0.7, 1.0, 1.3 [m]の条件で行い、それぞれの位置での反射超音波の振幅の測定を行い、閾値を決定し、検知領域の幅の測定を行った。反射超音波振幅の測定結果を図9, 10, 11に示す。表2に検知領域の幅の測定結果を示す。

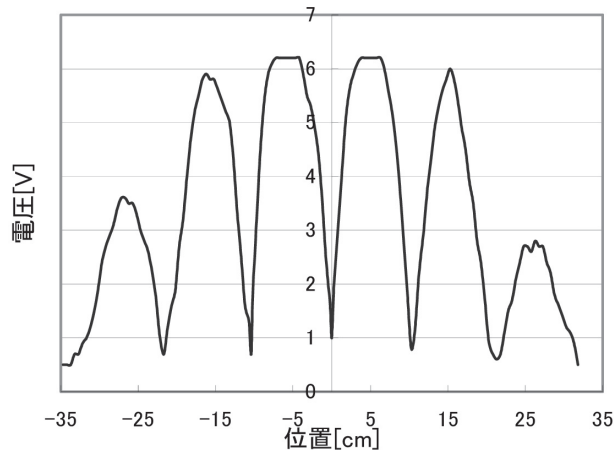


図9 反射超音波振幅 $d=0.7\text{m}$

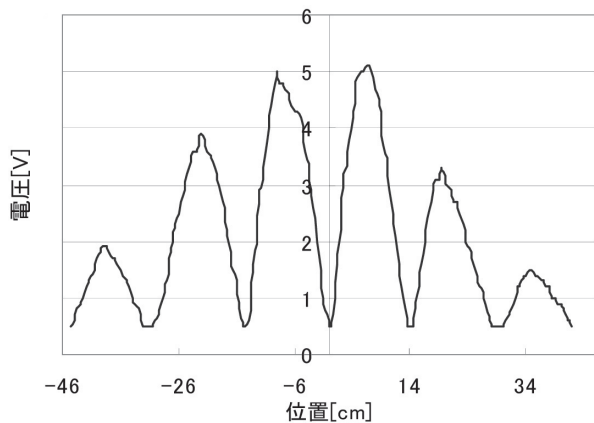


図10 反射超音波振幅 $d=1.0\text{m}$

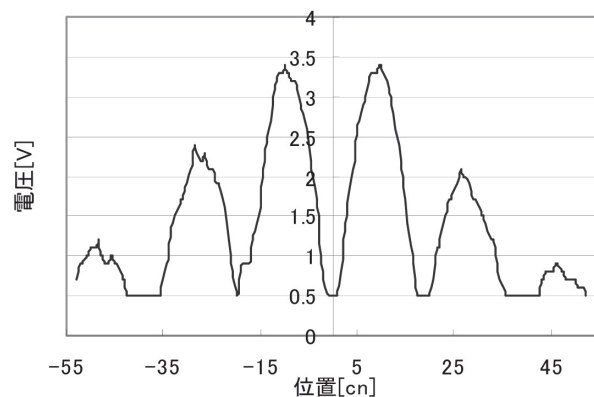


図11 反射超音波振幅 $d=1.3\text{m}$

表2 検知領域の幅測定結果

d[m]	閾値[V]	検知領域の幅[m]
0.7	2.0	0.51
	2.5	0.46
	3.0	0.40
1	2.0	0.44
	2.5	0.37
	3.0	0.32
1.3	2.0	0.36
	2.5	0.25
	3.0	0.15

4-4. 検知回数, 速度測定結果

検知回数の測定は、移動体が音場中を通過している最中に返ってくる反射超音波パルス数をカウンタ回路により計数をした。測定は4-3節と同じく測定距離と閾値を変更して行った。この結果から式(3)を用いて速度を算出した。また、これらの偏差および誤差を計算し、検知回数および速度の測定結果とともに表3に示す。

表3 検知回数, 速度測定結果

d[m]		閾値[V]	検知回数[回]	速度[m/s]	偏差[%]	誤差[%]
0.7	参照速度			0.284		
	測定速度	2.0	73.6	0.299	2.0	5.2
		2.5	67.0	0.329	2.3	13.7
		3.0	60.2	0.291	2.3	2.5
1	参照速度			0.292		
	測定速度	2.0	60.5	0.315	2.0	7.3
		2.5	52.9	0.308	1.6	5.1
		3.0	46.2	0.299	2.3	2.3
1.3	参照速度			0.288		
	測定速度	2.0	47.3	0.332	3.6	13.4
		2.5	25.2	0.447	6.2	35.6
		3.0	18.5	0.328	5.4	12.2

5. 不確かさ解析

本章では、移動速度測定の精度を検証する。

5-1. 速度測定の偏差

移動速度を求める式(3)を次に示す。

$$\text{移動速度} = \frac{\text{検知領域の幅}}{\text{通過に要する時間}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$V = \frac{L}{T \times N}$$

式(3)より移動速度の測定値の偏差の要因としては、検知領域の幅 L の偏差 σ_L 、検知回数 N の偏差 σ_N 、パルス発信周期 T の偏差 σ_T が考えられる。ま

た、移動体自体の速度の偏差 σ_{V0} も要因の一つとして考えられる。よって測定値の移動速度 V の偏差 σ_V は次式となる。

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_N^2 + \sigma_T^2 + \sigma_{V0}^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

5-2. 移動体自体の速度偏差 σ_{V0}

測定結果（表1）より参照速度 V_R の偏差 σ_{VR} が 1.0～1.2% となっている。参照速度測定における偏差の要因は、ストップウォッチによる偏差 σ_{VA} 、移動体自体の速度変化による偏差 σ_{V0} が考えられる。ストップウォッチでの偏差 σ_{VA} を確認したところ約 1.1% 程度であった。したがって参照速度の偏差 σ_{VR} は移動体自体の偏差 σ_{V0} により中心値 1.1% から 0.1% 増加し 1.2% になったと考えることができる。これより移動体の偏差 σ_{V0} は以下の式より求めることができる。

$$\begin{aligned} \sigma_{VR} &= \sqrt{\sigma_{V0}^2 + \sigma_{VA}^2} \\ 1.2 &= \sqrt{\sigma_{V0}^2 + 1.1^2} \quad \dots\dots\dots (5) \\ \sigma_{V0} &= 0.5 [\%] \end{aligned}$$

よって移動体自体の速度 V_0 の偏差 σ_{V0} は大きく見積もっても 0.5% だと考えられる。

5-3. 検知回数の偏差 σ_N

前任者の研究により検知回数の期待値 N_E は理想的な検知回数 $\bar{N}$ より 0.42 回少なく計数されることが分かっている⁶⁾。基準となる検知回数を N_0 とすると、 $\bar{N}$ と N_E は次式で表される。

$$\begin{aligned} \bar{N} &= N_0 + 0.5 \\ N_E &= N_0 + 0.08 \end{aligned}$$

通過時間のばらつきの最大幅は 1 周期分 T に相当する。これを $\pm 2\sigma$ に対応するものと考ええると、通過時間の偏差は $T/4$ となる。したがって σ_N は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_N &= \frac{T/4}{(N_0 + 0.08)T} \\ &= \frac{0.25}{N_0 + 0.08} \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

今回行った実験では検知回数が約 20～70 回であった。そのため σ_N は約 0.3～1.3% 程度あったと思われる。

5-4. パルス発信周期の偏差 σ_T

パルス発信周期の偏差は回路に使用している抵抗やコンデンサの温度依存性などが考えられる。実験に使用した超音波パルスは、発振回路 555 の抵抗とコンデンサを用いて発振している。したがって、抵抗とコンデンサの値が変化すると周期も変化する。特にコンデンサは、0.1～0.4 [%/℃] 程度変化する。実験の前後で温度を測定したところ、約 1℃ の変化が見られた。そのため σ_T は大きくとも 0.4% と考えられる。

5-5. 検知領域の幅の偏差 σ_L

式(4) および測定結果（表3）より σ_L を求め、まとめたものを表4に示す。

表4 偏差まとめ

測定距離[m]	閾値[V]	σ_{V0} [%]	σ_T [%]	σ_N [%]	σ_L [%]	σ_V [%]
0.7	2.0	0.5	0.4	0.3	1.9	2.0
	2.5	0.5	0.4	0.4	2.2	2.3
	3.0	0.5	0.4	0.4	2.2	2.3
1	2.0	0.5	0.4	0.4	1.9	2.0
	2.5	0.5	0.4	0.5	1.4	1.6
	3.0	0.5	0.4	0.5	2.2	2.3
1.3	2.0	0.5	0.4	0.5	3.5	3.6
	2.5	0.5	0.4	1.0	6.1	6.2
	3.0	0.5	0.4	1.3	5.2	5.4

以上の結果より偏差の大部分が検知領域の幅の偏差 σ_L によるものといえる。これは空気の揺れなどにより反射超音波振幅が揺れ検知領域の幅に変動が生じたと考えられる。

$d = 1.0\text{m}$ の音場（図10）の左から二つ目の山を例に取り検討する。図12は音場の山をモデル化したものである。

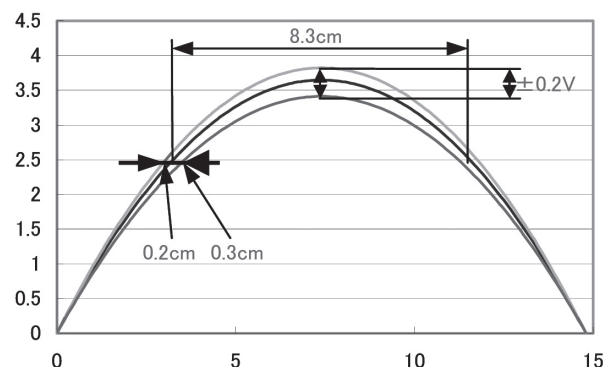


図12 音場変動のモデル

反射超音波振幅は $\pm 0.2\text{V}$ 程度の揺れが感じられた。その場合、閾値 2.5V では図12より検知領域の幅は約 1.0cm 変動する。同様に、三つ目、四つ目、

五つ目の山についても理論曲線から変動幅を求めたところ、全体で3.0cmであった。この変動幅を 4σ と考えると、 $\sigma=0.75\text{cm}$ となる。全体の検知領域の幅は32.8cmなので σ_L は以下ようになる。

$$\sigma_L = \frac{0.75}{32.8} \times 100 = 2.3[\%]$$

測定結果の偏差は約1.5%であり、この推定値2.3%はやや大きい。他の条件ではこの程度の結果が出ており必ずしも不合理とは言えない値である。したがって、検知領域の幅の偏差は主に反射超音波振幅の揺れと考えて良いと思われる。

5-6. 速度測定の誤差

ここでは、偏差ではなく誤差（表3）について考察する。

速度測定では平均的に5~10%の誤差が出ている。この誤差の主因は検知領域の幅の測定方法にあると思われる。図9, 10, 11に示す音場の受信電圧は反射超音波の振幅変動のほぼ平均値を読み取ったものである。一方、移動速度測定に用いた検知領域の幅の測定は、移動速度測定の直前に反射波の有無により測定したものである。すなわち、移動体をゆっくり移動させ、検知装置のカウンタの表示が動き始めた位置から、終わった位置までの幅を測定するというものである。そのため、わずかでも反射超音波振幅が閾値を超えていると検知装置が作動するため、反射超音波振幅の揺れの最大で検知領域を測定し、検知領域の幅を相当大きく見積もっていたことになる。それに対して移動体が通過する場合は、検知回数は反射超音波振幅の揺れの平均的なところで計数していたため検知領域の幅は平均的なものに落ち着き、上述のものよりも相当小さくなる。したがって、算出された速度は参照速度よりも速く測定されたと思われる。

測定距離 $d=1.3\text{m}$ 、閾値2.5Vの場合では誤差が35.6%と極端に速く測定されている。この要因としては、閾値が図11の左から二つ目の山では音場の山の頂上すれすれだったことが考えられる。検知領域の幅は揺れの最大を取っていたため、この山の検知領域の幅はおよそ5.8cmと測定されているが、実際はこの図からも分かるように、受信電圧の平均値からすると、一回も計数されない確率が高い。そのため速度の誤差が35.6%と極端に速く測定されたものと思われる。

以上のことから、誤差を小さくするためには検知領域の幅の測定方法および閾値の決め方を見直す必

要があると思われる。反射超音波振幅の揺れの影響を考慮した検知領域の幅の測定を行うか、繰り返し実験を行い検知領域の幅の補正を行うなどの対策が考えられる。また、閾値は音場の頂点の電圧から十分小さくまたは大きくなるよう決定する必要がある。

6. 考察

①反射超音波の揺れについて

反射超音波振幅の測定中、超音波の強度には揺れが見られた。これは測定結果より偏差、誤差ともに大きな影響を与えていることが分かった。揺れが生じる要因としては、空気の揺れが考えられる。実験を行った部屋には換気扇があった。それにより空気に流れが生じたと考えられる。また、窓から入る日光により温度変化が生じ対流が生まれたと考えられる。これらを低減することでさらに詳細なデータが得られると思われる。

我々が開発している方法では、超音波が空中を伝搬する際に空気の揺れのために揺らぐという本質的な問題を抱えている。もし、超音波ではなく電波等で同様な測定が可能であればこの問題はなくなり、さらに精度の良い測定ができると思われる。

②装置改良によるSN劣化について

以前までの装置は送信センサが二つ、受信センサが一つであった。今回改良した装置は送信センサが一つ、受信センサが二つというものである。そのため前回までの装置の受信波の強度は大きく雑音は小さい。相対的に今回は、一個の受信センサの受信波の強度は小さく雑音は大きく感じられた。このような信号を二つ加算してもSNの改善は見られなかった。そこで、この改善策として、装置の一つ一つの回路を金属ケースに入れる、配線をより線にする、という方法を取りノイズの低減はできたが以前の装置に比べるとまだノイズが残っていた。そのため、低い閾値ではノイズの影響があり測定に支障が生じた。

7. 結言

①送信センサを一つ、受信センサを二つ用いることで移動体が左右どちらから来ているのかの判定を行うための装置を考え、NANDによる順序判定回路を用いた移動方向判定回路を製作し、以前まで使用していた超音波送受信装置、検知回数測定装置と組み合わせることで、新たな装置を製作し

た。

- ②受信センサ間距離を3.3cmと6.0cmの2通りで実験を行い、どちらでも移動方向の判定が確実にできた。そこで、速度測定を行うための複峰音場の形状を5～6峰にするため、受信センサ間距離を6.0cmと決定した。
- ③反射超音波の閾値や測定距離をパラメータとして速度測定を行った。速度測定の偏差は約2%あった。主な要因としては空気の揺れによる反射超音波振幅の揺れのために検知領域の幅が変化したと考えられる。
- ④速度測定の誤差は良い結果で2.3%，悪い結果で35.6%速く測定された。このような大きな誤差が生じた要因としては検知領域の幅の測定方法にあると考えられる。反射超音波振幅の揺れにより検知領域の幅が最大になったところを測定したため速度が実際より速く測定されたと考えられる。また、閾値の設定が不適切だと、35.6%のような大きな誤差が出てしまうことが分かった。

参考文献

- 1) 茂木良平，水野 歩 “超音波による移動物体識別のための基礎研究” 日本機械学会東北支部第41期秋季講演会講演論文集 No.2005-2 P.9-10 2005.09.09
- 2) 森上昌也，中司浩生 “近距離移動物体の距離・速度測定の一方法” 電子情報通信学会大会講演論文集 Vol.2000 総合2 P.215 2000.03.07
- 3) 三本 雅，藤坂貴彦 “同相検波信号のみを用いるFMCWレーダにおける目標測距・測速度アルゴリズム” 信学技報 TECHNICAL REPORT OF IEICE, SANE97-145, SAT97-143 1998.02
- 4) 山口隆司，松田忠重 “動画を用いたフーリエ変換による速度測定” 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集 (CD-ROM) Vol.2006 P.G2-11 2006.11.15
- 5) 伊藤桂太 “超音波による前方横切り移動物体の速度測定” 日本機械学会 東北支部第43期秋期講演会 講演論文集 No.2007-2 2007年9月29日
- 6) 虻川誠也 “超音波による前方横切り移動物体の速度測定” 秋田工業高等専門学校 H19年度卒業論文 P.4-7