

超音波による前方横切り移動物体の速度測定

伊藤 桂太・茂木 良平

A study for measuring of velocity at which a object traverses forward by using ultrasound

Keita ITO and Ryohei MOTEGI

(2007年11月30日受理)

We studied a method for measuring of velocity at which a object traverses forward. In our research, we measure the velocity by the number of times of obtaining a reflecting wave from sound field which was built forward. We experimented with both single-pole sound field and multiple-pole sound field. And we set the velocities of the moving objects at 23.5cm/s, 35cm/s, and 41cm/s. As a result, the mean velocities of measurement agreed approximately with the real velocities of the moving object, and the deviations were within $\pm 10\%$.

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レーダ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速度を測定する方法としては、画像処理を利用するものなどがある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。

本研究は、比較的規模の小さい装置でありながら、一点から前方を横切る物体の速度を測定する方法の確立を目指す。このような測定方法が確立されれば、画像装置に変わる交通の観測、灯台のようなステーションからの海上交通の観測、オフィス内の人物の移動等の観測に使用できると考えられる。

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。もちろん、波としては電波等を利用して原理的に同様のものが検討できると考えられる。超音波パルスを一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速度を測定する方法を試みた。

実験を行い原理を確認するため、実験装置を構成し製作した。そして、音場の形状として単峰と複峰の2種類を用い、移動物体からの反射波の回数を測定した。さらに、各種条件を変更した実験により測定方法の改善点、不確かさ要因等について検討した。本報告では、これらの実験について述べ、本測定方式の不確かさ要因について検討し考察する。

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を測定する原理について述べる。

観測点に設置された超音波送受信器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は予め設定されており、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。

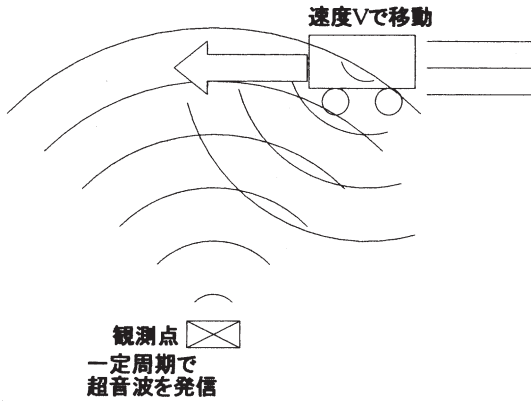


図1 本方式のイメージ図

2.1 発信超音波パルス

製作した超音波送受信器は、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。

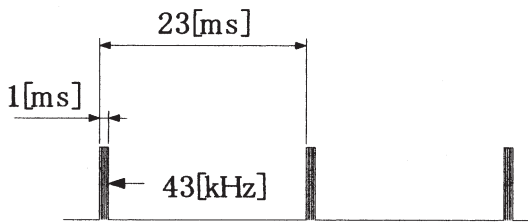


図2 発信超音波パルス

2.2 形成される音場

音源が一つの場合と二つ並べた場合の2種類の場合で実験を行った。形成される音場は、図3に示すように音源が一つの場合は単峰音場となっており、音源を二つ並べた場合は、波の干渉により干渉縞状に複峰音場となっている。また、音場形状は送信される超音波の周波数と指向性、二つ並べた際の音源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器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。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。干渉縞状に形成された検知領域の場合は、各々の検知領域の幅を L_i とする。

複峰音場にする利点として、現段階では測定していないが、将来的に各検知領域での検知回数を計数することにより移動物体が装置正面を通過する前に速度を求めることができると想定している。また、

複峰音場を利用して移動物体が左右どちらから通過したのかを判別できるようになると考えている。

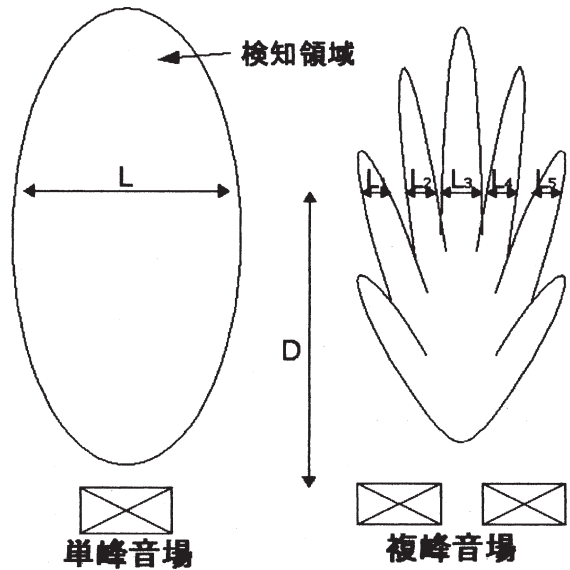


図3 形成される音場

2.3 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検知領域を通過中に得られる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 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。

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

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。したがって次式となる。

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

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 ($T \times N$) で除して求められ、次式のようなになる。

$$\text{移動速度} = \frac{\text{検地領域の幅}}{\text{経過に要する時間}} \dots\dots\dots (3)$$

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

図 4 に検知領域の幅 L=400 [mm], パルス周期 T=23 [ms] の場合の理論曲線を示す。

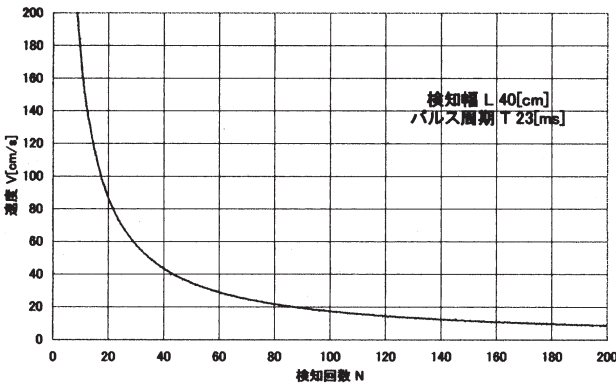


図 4 理論曲線

3. 実験方法

3.1 実験装置

超音波送受信器は、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。超音波送受信器の主な仕様は、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、反射波の有無を判別する閾値を任意に変更する閾値回路と、検知反射パルス数を計数する計数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ようにした。

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。

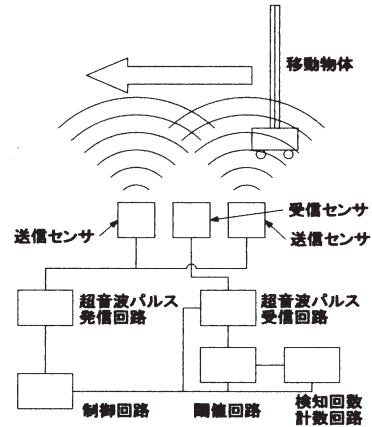


図 5 実験装置の概要

3.2 移動速度の測定

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。移動物体が実際の音場の通過位置を含む二点間 (距離 1 [m]) を通過するのに要する時間をストップウォッチで測定した。ストップウォッチは0.01 [s] まで測定できるものを使用し、20回測定し平均値を使用した。

3.3 検知領域の幅の測定

また超音波による測定の直前に検知領域の幅 L を測定するために反射超音波の振幅分布を測定した。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した。閾値により、検知領域の幅が決定される。図 6 に d=1 [m] の場合の単峰音場の反射振幅分布を示し、例として閾値 3 [V] の場合の検知領域の幅を示す。同様に、図 7 に複峰音場の反射振幅分布を示し、例として閾値 3 [V] の場合の検知領域の幅を示す。

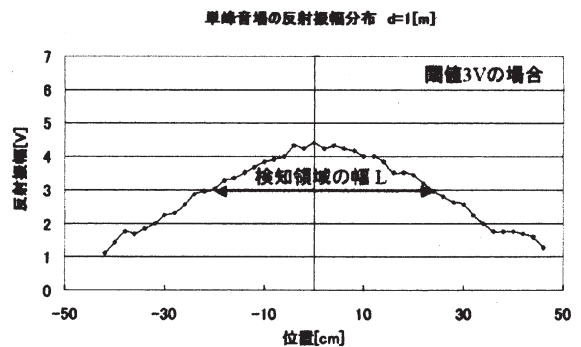


図 6 単峰音場の反射振幅分布

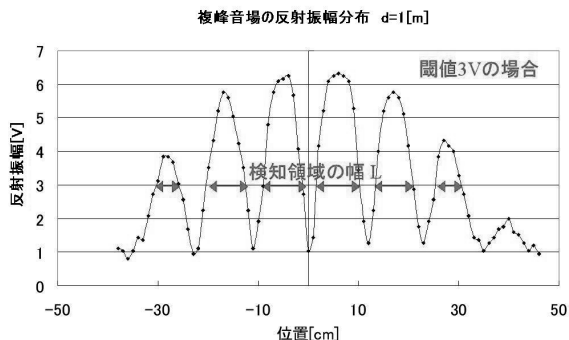


図7 複峰音場の反射振幅分布

3.4 通過時間の測定

通過時間は、移動物体をある速度で検知領域を横切らせたときの、反射超音波パルスの検知回数を計数し、測定された検知回数にパルス周期を乗じて算出した。

3.5 実験条件

実験は表1の実験条件にもとづいて、各変数の値を変更しながら行った。

移動物体の速度35.35 [cm/s] は電車模型の標準電圧9 [V] で使用した場合の速度で、23.53 [cm/s] と40.37 [cm/s] はそれぞれ6 [V] と12 [V] で使用したときの速度である。12 [V] を超えた実験は電車模型に使用されている回路の動作が不安定になると考え行わなかった。反射波の閾値は、単峰、複峰それぞれの反射振幅分布を検討し3.0 [V]、3.5 [V]、4.0 [V] に設定した。測定距離dは大部分の実験で1 [m] に固定している。ただし、距離の影響を調査するため、複峰音場で移動速度35.35 [cm/s] の条件では1.5 [m] の実験も行った。各々の条件で20回実験を行い、平均値と標準偏差を求めた。

表1 実験条件

実験変数	実験値
移動物体の速度	23 [cm/s], 35 [cm/s], 40 [cm/s]
反射波の閾値	3 [V], 3.5 [V], 4 [V]
音場の形状	単峰, 複峰
測定距離	1 [m], 1.5 [m]

4. 実験結果

4.1 検知領域の幅の測定結果

表2に単峰音場の検知領域の幅Lの測定結果を、表3に複峰音場の検知領域の幅Lの測定結果を示す。例えば、単峰音場では、閾値3 [V] のときL=425 [mm]、複峰音場ではL=380 [mm] となっていた。

表2 単峰音場の検知領域の幅 L の測定結果
単峰音場 (d=1 [m])

閾値	L
3.0 [V]	425 [mm]
3.5 [V]	250 [mm]

表3 複峰音場の検知領域の幅 L の測定結果
複峰音場 (d=1 [m]) 単位 [mm]

閾値	d	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L
3.0 [V]	1 [m]	35	65	80	80	70	50	380
3.5 [V]	1 [m]		55	70	80	65	20	290
4.0 [V]	1 [m]		55	65	70	55		245
3.0 [V]	1.5 [m]		5	70	65	25		165

4.2 通過時間の測定結果

単峰音場の場合の実験結果を表4と図8に、複峰音場の場合の実験結果を表5と図9に示す。図中には誤差10 [%] となる線を引いてある。移動速度は3-2節で述べた測定の結果によるものである。測定速度は、発信周期23 [ms] に測定した検知回数Nを乗じたもので対応する検知領域の幅Lを除したものである。エラーバーは平均値の上下に偏差の2倍を取ってある。

表4 単峰音場の実験結果

閾値	3 V		3.5V	
	測定速度	偏差	測定速度	偏差
移動速度	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s
23.53	23.38	0.44	23	1.25
35.35	35.12	1.03		
41.37	38.48	1.01	40.85	2.47

各条件で20回実験を行い、平均値と標準偏差を求めた。

測定結果 単峰音場

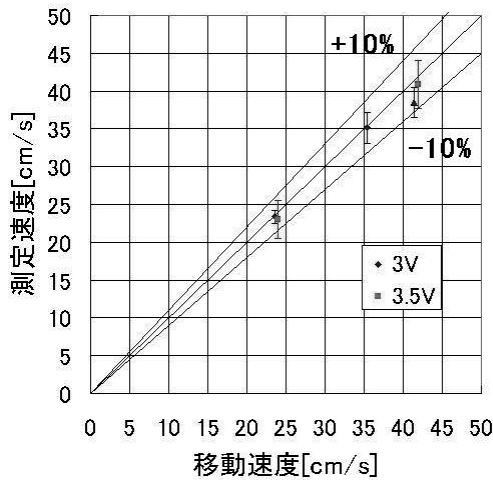


図8 単峰音場の実験結果

前頁の図8, および図9をみると各速度でのエラーバーは, ほぼ±10 [%] の誤差以内に入っていた。

表5 複峰音場の実験結果

閾値	3 V		3.5V		4 V	
移動速度 cm/s	測定速度 cm/s	偏差 cm/s	測定速度 cm/s	偏差 cm/s	測定速度 cm/s	偏差 cm/s
23.53	23.77	0.83	23.05	0.65	24.89	0.94
35.35	35.03	0.84	33.82	1.24	33.35	1.41
41.37	41.12	0.92	39.1	1.60	42.12	2.1

各条件で20回実験を行い, 平均値と標準偏差を求めた。

測定結果 複峰音場

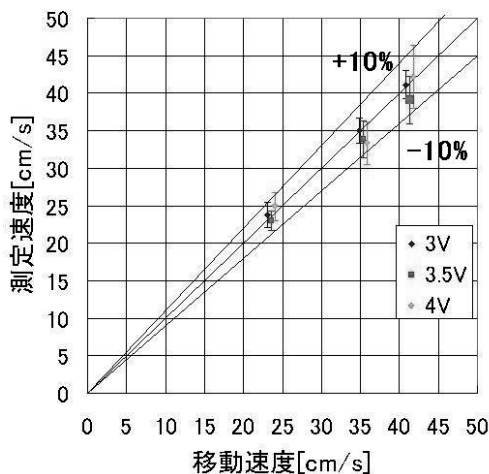


図9 複峰音場の実験結果

4.3 距離を変更した場合の測定結果

次に, 測定距離を1.5 [m] に変更した場合の各実

複峰音場の反射振幅分布 d=1.5[m]

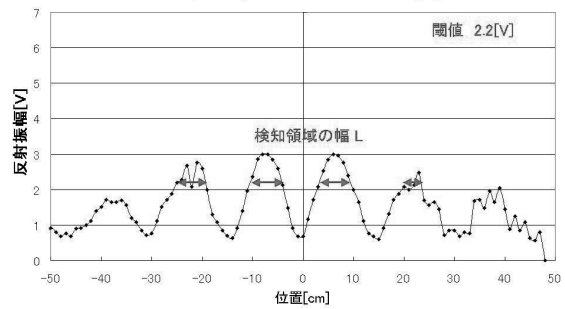


図10 測定距離1.5 [m]とした場合の反射振幅分布

験の結果を示す。距離を1 [m] から1.5 [m] としたところ, 単峰音場の反射波は十分な振幅が得られなかったため実験は複峰音場でのみ行なった。図10に超音波パルスの反射振幅分布を, 表6に速度の測定結果を示す。偏差が4.34 [cm/s] となり, 距離1 [m] のときの偏差の3~4倍になっている。

表6 測定距離1.5 [m]とした場合の実験結果

閾値	2.2V	
移動速度 cm/s	測定速度 cm/s	偏差 cm/s
35.35	32.98	4.34

各条件で20回実験を行い, 平均値と標準偏差を求めた。

5. 不確かさ解析

本章では, 本研究の移動速度測定方式の精度を検証する。

5.1 不確かさの式

まず, 移動速度を求める式(3)を次に再掲する。

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

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

検知領域の幅 L の不確かさを δL , 検知回数 N の不確かさを δN , パルス発信周期 T の不確かさを δT とすると, 移動速度 V の不確かさ δV は次式となる。

$$\delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial L} \delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial N} \delta N\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T} \delta T\right)^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\delta V}{V} = \sqrt{\left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2} \dots\dots\dots (5)$$

本章では、例として単峰音場、閾値 3 [V]、移動速度 23.53 [cm/s] の条件及び、単峰音場、閾値 3.5 [V]、移動速度 41.37 [cm/s] の条件における各要素の不確かさについて検討する。

5.2 検知領域の幅の不確かさ δL

単峰音場で閾値 3 [V] の場合、表 2 より検知領域の幅 L は 425 [mm] であった。そのときの検知領域の幅の不確かさ δL の要因として考えられるのは、 L を測定した巻尺の読み取り誤差として ± 0.5 [mm] と、気温の変動にともなう検知領域の幅 L の変化の二点である。

閾値 3.5 [V] の測定の際に室温の上昇があったので検知領域の幅 L を再測定すると、検知領域の幅は約 40 [mm] 増加していた。このとき速度を再測定し数値を測定値を修正したので、これらによる誤差は小さいと思われるが、実験中に半分の 20 [mm] 程度は生じていたと考えざるを得ない。そこで $\delta L = 20$ [mm] とした。

$$L = L_{mean} \pm \delta L \dots\dots\dots (6)$$
$$= 425 [mm] \pm 20 [mm]$$

同様に、閾値 3.5 [V]、移動速度 41.37 [cm/s] の条件では

$$L = L_{mean} \pm \delta L \dots\dots\dots (7)$$
$$= 250 [mm] \pm 20 [mm]$$

5.3 検知回数の不確かさ δN

単峰音場で閾値 3 [V]、移動速度 23.53 [cm/s] の場合、検知回数 N の平均値は 69.6 回であった。表 4 の測定速度 23.38 [cm/s] はパルス周期 23 [ms] と 79.1 回との積で前節で述べた $L = 425$ [mm] を除いたものである。そのときの実験結果より N の不確かさ $\delta N = \pm 2\sigma$ として ± 2.9 回であった。

検知回数の不確かさの要因として考えられるのは、超音波パルスを発信するタイミングが考えられる。超音波パルスは 23 [ms] の周期で繰り返し発信されるが、移動物体が検知領域に入るタイミングと超音波パルスが反射されるタイミングが同じとは限らないため ± 1 回程度の不確かさが発生する。その他の要因として反射振幅の揺れも考えられる。超音波の振幅は空気の流れやセンサの振動などで揺れており、閾値付近では検知したりしなかったりと不確かさの要因になりうる。検知回数の不確かさの主因はこれであると思われる。

$$N = N_{mean} \pm \delta N \dots\dots\dots (8)$$
$$= 79.1 \pm 2.9$$

同様に、閾値 3.5 [V]、移動速度 41.37 [cm/s] の条件では

$$N = N_{mean} \pm \delta N \dots\dots\dots (9)$$
$$= 26.7 \pm 1.6$$

5.4 パルス繰返し周期の不確かさ δT

実験ではパルス繰返し周期 T を 23 [ms] とした。パルスの繰返し周期の不確かさ δT の要因として考えられるのは、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、 $0.1 \sim 0.4$ [%/°C] 程度変化するので、実験中の温度変化を約 5 [°C] とすると、周期 T はおよそ 0.5 [ms] 変化する。したがって、 $\delta T = 0.5$ [ms] とした。

$$T = T_{mean} \pm \delta T \dots\dots\dots (10)$$
$$= 23 [ms] \pm 0.5 [ms]$$

5.5 不確かさのまとめ

以上の各要素を移動速度の不確かさの式に代入し計算すると次のようになる。

単峰音場で閾値 3 [V]、移動速度 23.53 [cm/s] の場合は

$$\frac{\delta V}{V} = \sqrt{\left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2}$$
$$= \sqrt{\left(\frac{20}{425}\right)^2 + \left(\frac{2.9}{79.1}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{23}\right)^2} \dots\dots\dots (11)$$
$$= \sqrt{(0.047)^2 + (0.037)^2 + (0.022)^2}$$
$$= 0.064$$

まとめると、

$$\frac{\delta L}{L} = 4.7\%, \quad \frac{\delta N}{N} = 3.7\%, \quad \frac{\delta T}{T} = 2.2\%$$
$$\frac{\delta V}{V} = 6.4\% \dots\dots (12)$$

同様に、閾値 3.5 [V]、移動速度 41.37 [cm/s] の条件では

$$\frac{\delta L}{L}=8.0\%, \quad \frac{\delta N}{N}=6.0\%, \quad \frac{\delta T}{T}=2.2\% \quad \dots\dots (12)$$

$$\frac{\delta V}{V}=10.2\%$$

となった。

以上の計算より、良い測定結果が得られた単峰音場で閾値 3 [V]、移動速度 23.53 [cm/s] の場合は測定速度の不確かさ約 6.4 [%] の要因として、検知領域の幅が約 4.7 [%]、検知回数が約 3.7 [%]、パルス発信周期が約 2.2 [%] と求められた。

一方、第 4 章 2 節で示した測定結果では、エラーバーは約 ±10 [%] となっていたが、これは、やや悪い測定結果が得られた閾値 3.5 [V]、移動速度 41.37 [cm/s] の場合の解析結果とほぼ一致しており本章で行なった不確かさ解析は妥当であると考えられる。

測定速度の不確かさの主因は検知領域の幅の不確かさで、温度変化にともなう超音波の指向性変化により検知領域の幅の変動したためと思われる。次に大きな要因は検知回数の不確かさで、超音波の反射振幅の揺れが検知回数に影響を及ぼしていると思われる。その他の要因としてコンデンサの温度特性によるパルス発信周期の変動を考慮する必要がある。

検知領域の幅の不確かさ δL を低減するためには、超音波測定の前後に L を測定して、平均値を用いる、あるいは、想定される温度範囲での L の校正曲線を測定しておく等の方法を考える必要がある。検知回数の不確かさを低減するためには、検知回数が多くなる測定条件を選択するということが考えられる。例えば、パルス送信周期 T を小さくするか検知領域の幅 L を広くする等がある。

今後、更なる精度向上のために超音波の揺れの低減と、パルス周期・気温を変化させた場合の実験データの収集を行う必要がある。

6. 考察

①精度と検知回数の関係

パラメータを変更した各種実験結果より、測定距離 $d=1$ [m] ではどの速度、閾値でもしっかりと速度を測定できていることが分かる。最も精度の良い実験条件は単峰音場、閾値 3 [V]、速度 23.53 [cm/s]、そのときの誤差約 0.6 [%]、偏差約 0.44 [cm/s] であった。全体の傾向として、精度は閾値を低く、また移動速度を遅くすれば良くなることが分かった。つまり、検知回数が多くなれば精度が良くなると考

えられる。

②単峰音場と複峰音場の違い

単峰音場と複峰音場の違いとして、精度は単峰音場のほうが良く、複峰音場の場合は閾値を設定する際に、各検知領域の頂点と閾値の差が小さいとノイズなどを検知してしまう場合があるので注意が必要であった。

③反射波の揺れと振幅

実験を行なったところ反射波の揺れが精度に影響していると思われた。例えば測定距離を 1.5 [m] に変更すると、図 10 から分かるように検知領域の幅 L が小さくなっており、測定距離が遠くなると反射波の揺れも大きくなった。この条件での偏差は、表 6 より 13.2 [%] となっており、精度が悪くなることが分かった。このことから距離を大きくとることは、反射超音波の揺れの影響があり、特に注意しなくてはいけない条件であると考えられる。

7. 結言

①超音波を用いて、ある観測点から前方を横切る移動物体の移動速度を測定する方法を導いた。

②本研究で導いた測定原理を確認するための装置を、移動物体として電池で動く電車模型を用い、超音波送受信装置、検知回数測定装置により構成し製作した。超音波音場として単峰音場を形成する方式と複峰音場を形成する方式とを採用した。

③実験条件として移動物体の速度、反射波の閾値、音場の形状、測定距離を変更しながら実験し、①で導いた原理で、前方を横切る移動物体の速度を測定することが出来た。

④測定速度の不確かさは条件の良い実験では約 ±6.4 [%] であり、条件の悪い実験では約 ±10.2 [%] となった。これは実験結果で得られた誤差範囲 ±10 [%] 強と比較して妥当な値であった。

⑤単峰音場で閾値 3 [V]、移動速度 23.53 [cm/s] の場合、各不確かさとして検知領域の幅の不確かさが 4.7 [%]、検知回数の不確かさが 3.7 [%]、送信周期の不確かさが 2.2 [%] あった、これらの要因としては温度変化にともなう検知領域の幅の変化と超音波反射波の揺れの検知回数への影響、そしてコンデンサの温度特性によるパルス発信周期の変動が主であると考えられる。

⑥単峰音場と複峰音場の違いとして、精度は単峰音場のほうが良く、複峰音場の場合は閾値を設定する際に、各検知領域の頂点と閾値の差が小さいとノイズなどを検知してしまう場合があるので注意が必要

であった。しかし、複峰音場は音源を二つ使用しているため反射振幅が強く単峰音場よりもより遠距離での測定もできた。

8. 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