

機上ドプラレーダ用超音波シミュレータ

丹 羽 登

佐下橋 市太郎

今 村 和 彦

An Ultrasonic Simulator for Airborne Doppler Radar

By

Noboru NIWA, Ichitaro SAGEHASHI

and Kazuhiko IMAMURA

Abstract: This paper describes a Doppler Radar Simulator using ultrasonic techniques in order to study and test the Airborne Doppler Radars in laboratory.

In this simulator ultrasonic waves under water are substituted for electromagnetic waves, where an ultrasonic transducer and reflecting elements on the bottom of a water tank are used in place of a microwave antenna and scattering surfaces of sea or land respectively. The scale factor of moving velocity, Doppler frequency and dimension of reflecting elements between the radar and the simulator is given by a ratio of wave length of the ultrasonic and the electromagnetic waves.

Descriptions are given on the transducers, the water tank, the carriage, the manipulator, several types of reflecting elements and the electronic block diagram of the simulator. Masking of the transducers is studied in order to change the shape of pencil and fan beam of ultrasonic waves.

With this simulator we investigated the change of Doppler signals caused by variations of velocity and attitude of an aircraft, the sea bias error due to a calm sea-surface, and Doppler frequency spectrum from good reflectors such as dams or large buildings. The signal obtained has been tape-recorded and the frequency spectrums are analyzed with a "Vibralyzer".

概 要

機上用ドプラレーダの検査や研究を地上で行なうために作られた超音波による疑似ドプラ信号発生装置と実験結果について述べたものである。

水中における超音波送受波器と水槽底面の反射物とを相対的に移動させて得られるドプラ信号とドプラレーダから得られる信号の周波数、反射物の大きさ、移動速度などの諸項が波長の比で縮小される事を説明した。

次いで、シミュレーションの方法と、試作した装置について、アンテナ系に相当する超音

波振動子と送信周波数, 航空機の飛行姿勢, 送受波器の移動方法と速度制御機構, 模型反射物および送受信器のブロックダイアグラム等について説明してある. またドプラ信号のスペクトラムと送受波器の指向性との関係を調べる目的で振動子の指向性を変える方法について述べた.

上記の装置で, 種々の反射物を用いて部分的ではあるが, 航空機の姿勢および速度の変化, sea bias error, グム, ビルディング等に相当する模型反射物からの反射によるドプラ信号の性質等を sonagram により検討を行ない, 本方式で得られるドプラ信号は実際のそれに近いものであり, シミュレータとして使用出来る事を示した.

目 次

- | | |
|----------------------|--|
| 1. はしがき | 3.4. 超音波シミュレータの構成 |
| 2. 超音波によるシミュレーション | 4. 試作装置による実験 |
| 2.1. 速度, 反射素子, 高度の縮小 | 4.1. 反射物の超音波入射角と反射強度の関係 |
| 2.2. 媒質の選定 | 4.2. 移動速度とドプラ周波数との関係 |
| 2.3. 周波数の選定 | 4.3. φ , ρ を一定とし, $\Delta\rho$ と f_d との関係 |
| 2.4. 移動方法 | 4.4. コーナフレクタによる実験 |
| 3. 試作装置の概要 | 5. 結 言 |
| 3.1. 水槽および移動架 | 参考文献 |
| 3.2. 送受波器 | |
| 3.3. 反 射 物 | |

1. は し が き

機上用ドプラレーダ [1] を地上で試験する一方法 [2] として超音波を用いた方法がある. この方法は Fig. 1 にその略図を示すごとく実際のドプラレーダを装備した航空機が飛行している状態に次に連記するごとく対応する.

- 1) 電磁波に相当するものとして水中の超音波を使う.
- 2) 地表面および海面に相当するものとして, 水槽底面に設けられた模型反射物を使う.
- 3) ドプラレーダのアンテナに相当するものとして, 超音波送受波器を使う.

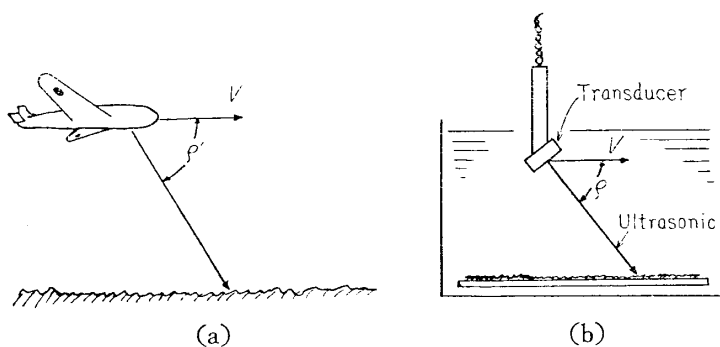


Fig. 1. (a) Airborne Doppler Radar and (b) it's Ultrasonic simulator.

この様な方法による超音波シミュレータの最も大きな特長はアンテナ系に相当する超音波振動子の姿勢を航空機の飛行姿勢, すなわち偏角, ピッチング, ローリング, などに相当するシミュレーションが出来ることと, その他移動中に振動子を上下させる事によって vertical speed の指示:

altitude hole effect などの試験も行ない得る事である [2][3].

2. 超音波によるシミュレーション

2.1. 速度, 反射素子, 高度の縮小

航空機の移動速度を V' , 機上ドプラレーダの送信周波数を f' , 電磁波伝播速度を c , とすれば機上で観測されるドプラ周波数 f'_d は次式で表わせる。(ただし Γ' は V' とビーム方向との角度である) Γ と V との位置関係は Fig. 2 に示す。

すなわち

$$f'_d = \frac{2V'f' \cos \Gamma'}{c} \quad (1)$$

超音波の場合は

$$f_d = \frac{2Vf \cos \Gamma}{v} \quad (2)$$

となる。(v: 超音波の音速)

ここで (1) 式と (2) 式の比をとると,

$$\frac{f'_d}{f_d} = \frac{V'f'v \cos \Gamma'}{Vf \cos \Gamma} \quad (3)$$

を得る。ここで $f'_d = f_d$ および $\Gamma' = \Gamma$ にとるとすれば (3) 式は次のようになる。

$$\frac{V}{V'} = \frac{f'v}{fc} \quad (4)$$

ここで $\frac{c}{f'} = \lambda'$, $\frac{v}{f} = \lambda$ とすれば

$$\frac{V}{V'} = \frac{\lambda}{\lambda'} \quad (5)$$

となる。(ただし λ' , λ はそれぞれ電磁波および超音波の波長)

(5) 式の意味を例示すれば, 例えば $f' = 8,800 \text{ Mc}$, $V' = 500 \text{ km/h}$, $f = 25 \text{ Mc}$, $v = 1,500 \text{ m/s}$ とすると (5) 式により必要な振動子の移動速度は $V = 24.5 \text{ cm/s}$ となる。このように同じドプラ周波数を得る場合には超音波シミュレータの振動子移動速度は, シミュレートしようとする航空機速度の (λ/λ') だけ縮小された速度で良いことになり, この程度の速度は実験室内で実現可能である。また反射素子, 高度についても同様に縮小される。

2.2. 媒質の選定

機上用ドプラレーダの超音波シミュレータに使用する媒質は次に記されるような諸点を考慮して選定しなければならない。

- 縮小率 (λ/λ') を小さくとれること, 高い周波数において減衰が少いこと。
- 使用される媒質内部に音響インピーダンスの異なった層または部分の生じにくい物質であること。温度, 湿度, 圧力 (大気圧) などによって, 超音波伝播速度 v , 密度 ρ 等

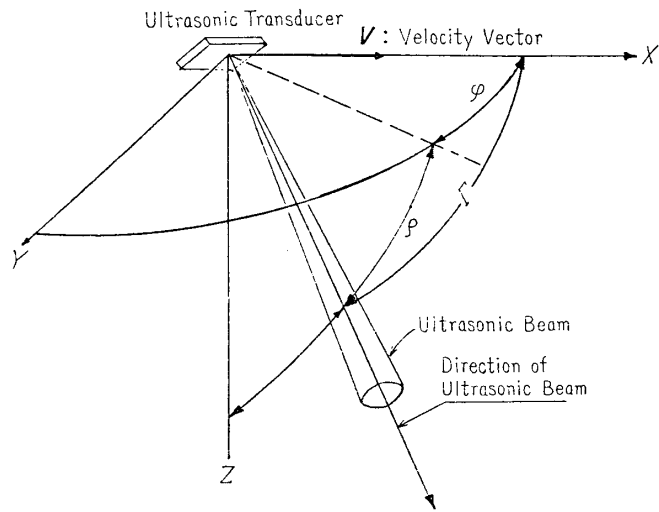


Fig. 2. Geometry of an ultrasonic simulator for a Doppler Radar.

がいちじるしい変化を受けない媒質であること。

c) 取扱いが容易であること。

などがあげられる。

上記 a) の項についてさらに考慮すべき点を述べる。今反射物に対して Fig. 3のごとく高度 h の所に送受波器を置き、輻射された超音波ビームの指向角を $\Delta\rho$ とし、送波受器の移動方向に対してビームの中心方向が角度 ρ をなしているとする。同図において

$$\overline{TA} = h / \sin(\rho + \frac{1}{2}\Delta\rho) \quad (6)$$

$$\overline{TB} = h / \sin(\rho - \frac{1}{2}\Delta\rho) \quad (7)$$

T 点から輻射された音波が A 点で反射され再び T 点にもどるのに要する時間を τ_{\min} とすれば

$$\tau_{\min} = 2\overline{TA}/v$$

同様に \overline{TB} 間を往復するのに要する時間を τ_{\max} とすれば

$$\tau_{\max} = 2\overline{TB}/v$$

ここで、 $\tau_{\max} - \tau_{\min} = \Delta\tau$ とすれば

$$\Delta\tau = \frac{2(\overline{TB} - \overline{TA})}{v} = 2 \left(\frac{h}{\sin(\rho - \frac{1}{2}\Delta\rho)} - \frac{h}{\sin(\rho + \frac{1}{2}\Delta\rho)} \right) / v \quad (10)$$

送信パルス幅を Δt とすれば、必要な受信時間 T_r は、

$$T_r > \Delta\tau + \Delta t \quad (11)$$

ゆえに送信パルスの繰り返し周波数 F_r は次式で表わせる。

$$F_r < \frac{1}{\Delta\tau + 2\Delta t} \quad (12)$$

またドプラ周波数 f_d と F_r とは次式の関係を満たさなければならない。

$$f_d < F_r \quad (13)$$

$$\therefore f_d < \frac{1}{\Delta\tau + 2\Delta t} \quad (14)$$

(14) 式において $\Delta\tau$ が大きくなれば、 f_d のとり得る範囲がせまくなり、 $\Delta\tau$ が小さければ広がる。 $\Delta\tau$ は (10) 式でわかるように v , ρ , $\Delta\rho$, h の函数である。この四つの因子のうち v は媒質の種類によって一義的にきまる値であるのに対して、 $\Delta\rho$, ρ , h は“どのような航空機の飛行状態のシミュレーションを行なうか”によって選ばれる値である。このような考えで (14) 式を見ると、(14) 式は“ ρ , $\Delta\rho$, h , f_d の値のとり得る範囲は v が大きいほど広がる”ことを意味している。

次に考慮すべきことは、Fresnel zone による制限である。すなわち、振動子 (送受波器)

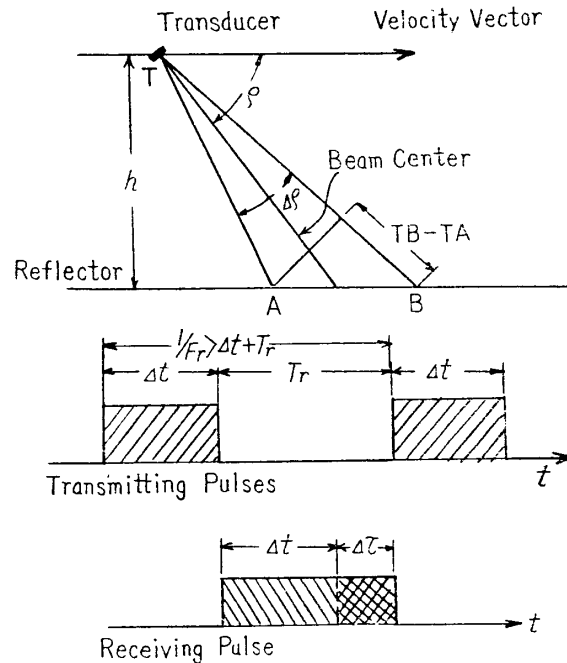


Fig. 3 Time relations between transmitted and received pulse.

の直径を D , 波長を λ とすると Fresnel zone をさけるために送受波器と反射面との距離は*

$$(\text{距離}) = \frac{h}{\sin \rho} > \frac{D^2}{\lambda} \quad (15)$$

である事が必要である。

このように媒質の選定にはきわめて多くの事から考慮しなければならない。次に主な媒質について二三の例を上げて比較する。

Table 1. Comparison of media, water, aluminum and air

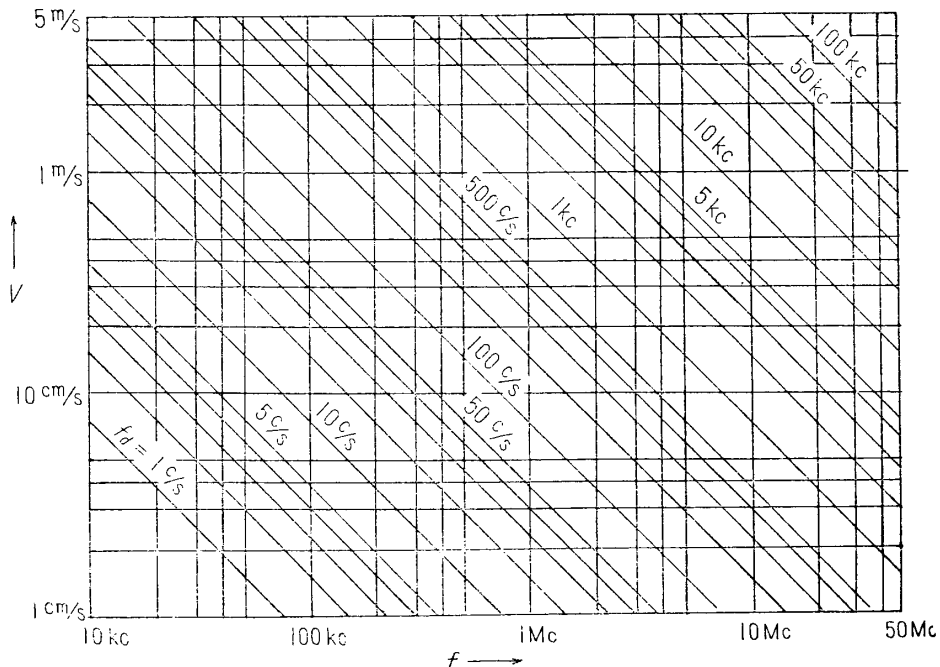
	音速 m/s	周波数範囲	波長 mm	縮小率	(14)式成立の範囲	実験の容易さ
水	1,500	~25 Mc	~0.06	1/570	やや広い	容易
アルミニウム	6,200	~15 Mc	~0.41	1/83	三つの媒質中一番範囲が広い	非常に困難
空気	340	~350 kc	~0.97	1/35	狭い	容易

Table 1 からわかるように空気は縮小率が大きく、(14) 式の成立する範囲がせまい。アルミニウムは (14) 式の成立する範囲は広いが、固体であるために実験上連続的な飛行姿勢の変化をシミュレートすることが出来ない。水は縮小率を小さくとれ実験上も容易である。以上の結論として媒質に水を使用した。

2. 3. 周波数の選定

媒質を水として(音速 $v=1,500$ m/s) (2) 式より f_d, V, f の関係を求めたものが Table 2

Table 2. Relations between velocity of transducer V , frequency of ultrasonic waves f and Doppler frequency f_d .



* 超音波技術便覧, 基礎編, 日刊工業新聞社 昭和 35 年発行

である[5]. 当面の問題となる f_a は数 100 c/s~15 kc 程度であり, 移動速度 V を 30 cm/s とすれば Table 2 から必要な送信周波数は約 37 Mc となる ($f_a=15$ kc として計算). このように高い周波数を使うとすれば, 振動子の製作上困難があることと, 水の減衰が非常に大きくなるために送受信器の設計上好ましくない等の制約を受ける. また今までに他の超音波応用面, 例えば水浸探傷法などの超音波に関する研究を行なって来た経験から見て 25 Mc 程度の周波数なら, 使えそうであるという考えから, 送信周波数は 25 Mc と 15 Mc の二つを選ぶこととした.

2.4. 移動方法

送受信器を反射物に対して移動させる方法と, 送受信器を固定して反射物の方を移動させる方法がある. 前者の場合媒質は反射面に固定されており, 後者は送受信器と共に移動すると考えて良い. このような相違が超音波シミュレータを用いる上にどのような影響を及ぼすかということは未解決であるが, 移動によって発生する水の乱れを出来るだけ少なくするように送受信器の形状などを考慮すれば, 移動によって生ずる不確定な要素を非常に小さくおさえ得ると考えられる. 次に移動方法の二三の例をあげる.

- a) 水槽底面に反射物をおき, その上部で送受信器を移動させる方法; この方法は長時間連続的にドプラ信号を得たい場合に不都合である.
- b) 送受信器を固定し反射物を移動させる方法; これも a) と同様長い時間のシミュレーションが困難である.
- c) 反射物をベルト上に配置し endless の反射面帯を作り, それを移動させる方法, この場合は長時間のシミュレーションが可能となる. しかし反射物の製作上に困難がある.
- d) 回転円板上に反射物を置き, それを回転させる方法; この方法は c) と同様に長時間のシミュレーションは可能であるが, 反射点の回転中心からの距離によって速度が異なるという欠点がある. 実用的な面では装置の小型化には便利と思われる.

3. 試作装置の概要

3.1. 水槽および移動架

試作した水槽は下記のようなもので Fig. 4 にその写真を示す. 同図 (a) は水槽および移動架, (b) は振動子保持部である.

移動架仕様:

移動範囲: 縦 (X 方向) 260 cm×横 (Y 方向) 80 cm×上下 (Z 方向) 60 cm

Y 方向移動速度: 0, 0.5, 1, 2, 4 cm/s, 4段切り換え, 自動方向転換, X 方向と連動可能, 手動可能.

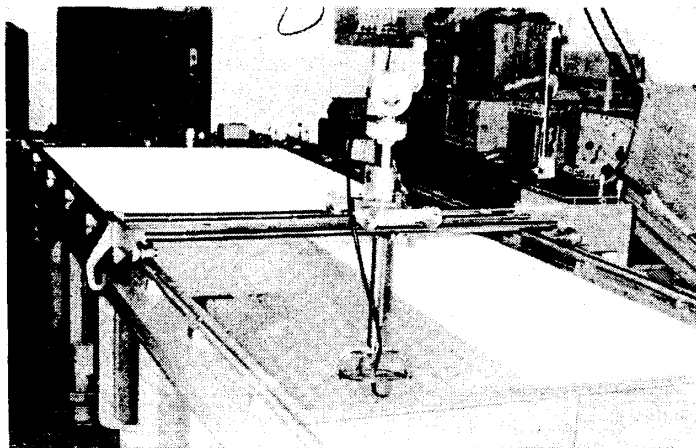
X 方向移動速度: 0~30 cm/s 無段変速, 自動方向転換, 手動可能.

Z 方向: 手動式, 底面より最大 60 cm.

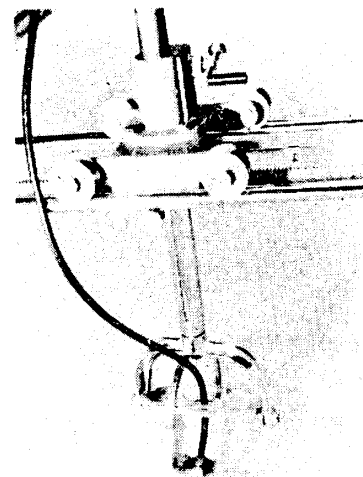
Z 軸回転角 360°, 俯仰角調整範囲+90°~0°~-90°.

3.2. 送受信器

超音波変換素子としては X cut 水晶振動子を使用している. また実験する上に種々の指向性をもつ送受信器が必要である事から, 直径の異なるものも製作使用している. 次に実

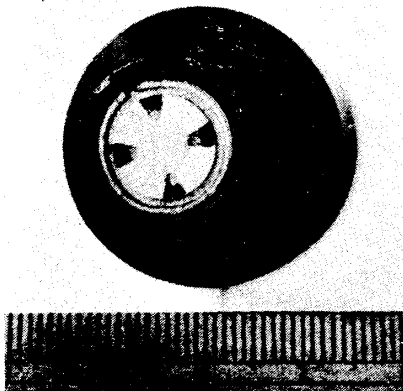


(a) Carriage and water tank



(b) Manipulator

Fig. 4. Carriage, water tank and Manipulator.



$f=15\text{ Mc}$, $5\text{ mm}\phi$

Fig. 5. An example of transducer.

のもの写真を示す。

送受波器と送信器との間の給電は $75\ \Omega$ 同軸ケーブルを用いた。この場合振動子とケーブルの整合をとる必要があるため Fig. 6 に示すように送受波器内部に整合回路を組み込んで使用した。

指向特性としては円型振動子のものばかりでなく、矩形振動子のもつ指向性のもの、すなわち一般にファンビームと呼ばれるものも実験上必要である。このようなファンビームを得るために 15 Mc 送受波器で直径 $20\text{ mm}\phi$ のものを用い、送受波器前面に、Fig. 7 で示してあるよ

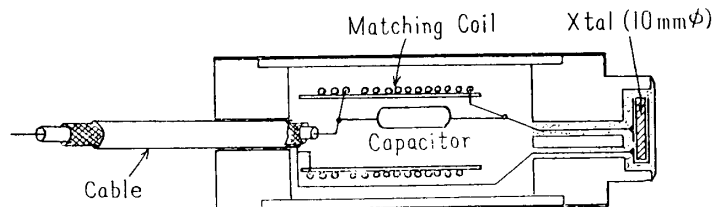


Fig. 6. A transducer unit with a matching circuit.

験に使った主な送受波器例をあげる。

- a) 25 Mc 送受波器: 直径 $10\text{ mm}\phi$ (超音波, 水浸探傷用振動子)
- b) 15 Mc 送受波器: 直径 $20\text{ mm}\phi$, $10\text{ mm}\phi$, $5\text{ mm}\phi$, $4\text{ mm}\phi$, $3\text{ mm}\phi$, $2\text{ mm}\phi$ のもの。Fig. 5 に $5\text{ mm}\phi$

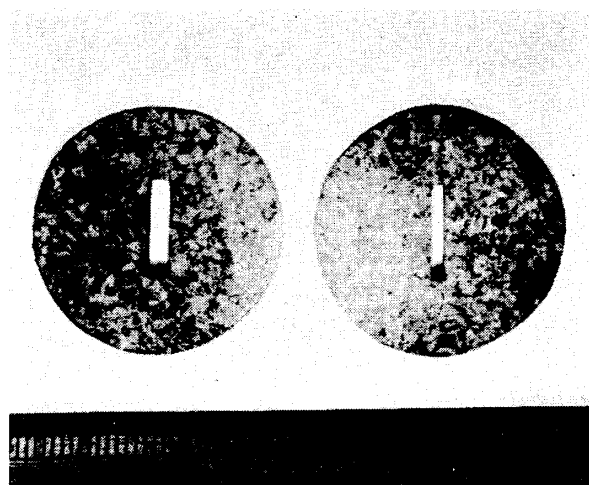


Fig. 7. Cork masks to obtain fan beam.

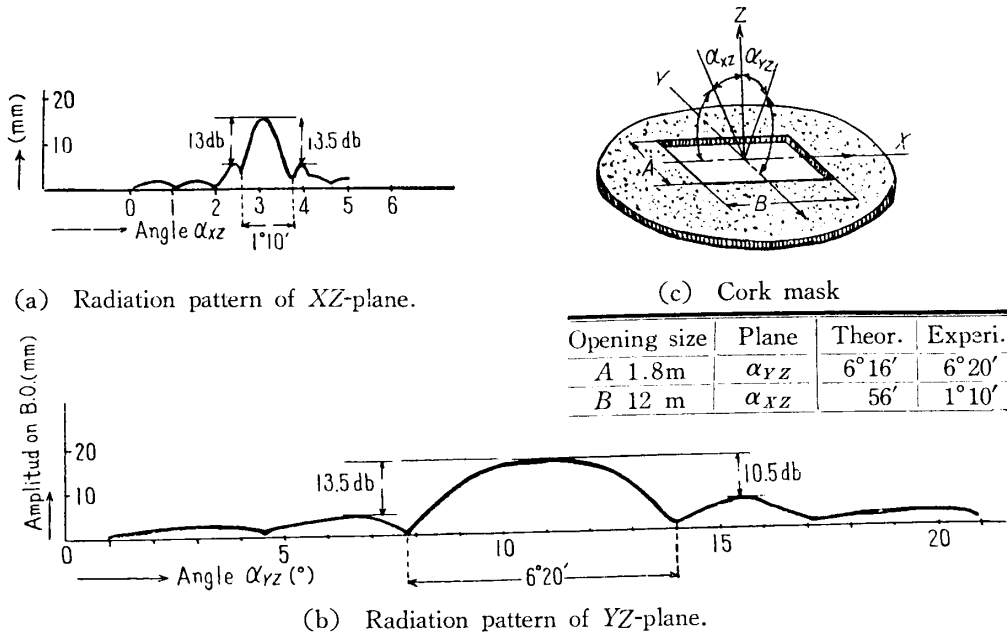


Fig. 8. Radiation patterns of a transducer cover with the cork mask.

うなコルクに孔をあけたものをつけて使用した。Fig. 8 (a) および (b) はこのような方法で得られる指向特性の測定例である。

3. 3. 反 射 物

下記のものを実験に使用している。

- a) Al 板に紙やすりでほぼ一様な傷をつけたもの。
- b) ガラス面にメッシュ #60, #100, #130, #200, #300, #400 の種々の粒度をもつカーボランダムを付着させたもの, その他砂, 小石など。
- c) 粗面ガラスすなわち吹き消しガラス, すりガラス, ダイアガラス等。
- d) コーナレフレクタ, 種類の直径の金属球 (ボールベアリング用のもの, 放電間隙用など)。

3. 4. 超音波シミュレータの構成

Fig. 9 に 25 Mc 用のブロック図を示す [3]。中央の点線の左側が試作した 8,800Mc, 機上用ドプラレーダの中間周波数および同期回路の一部で, 右側が本来のシミュレータで

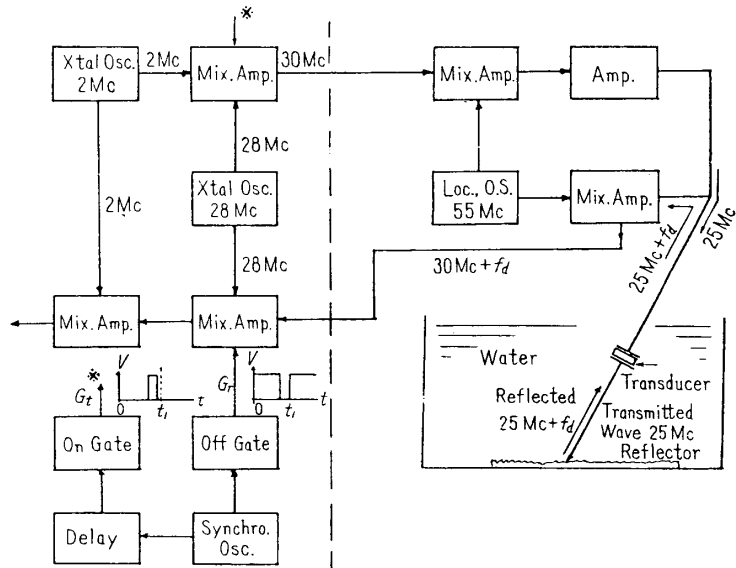


Fig. 9. Block diagram of ultrasonic simulator at 25 Mc.

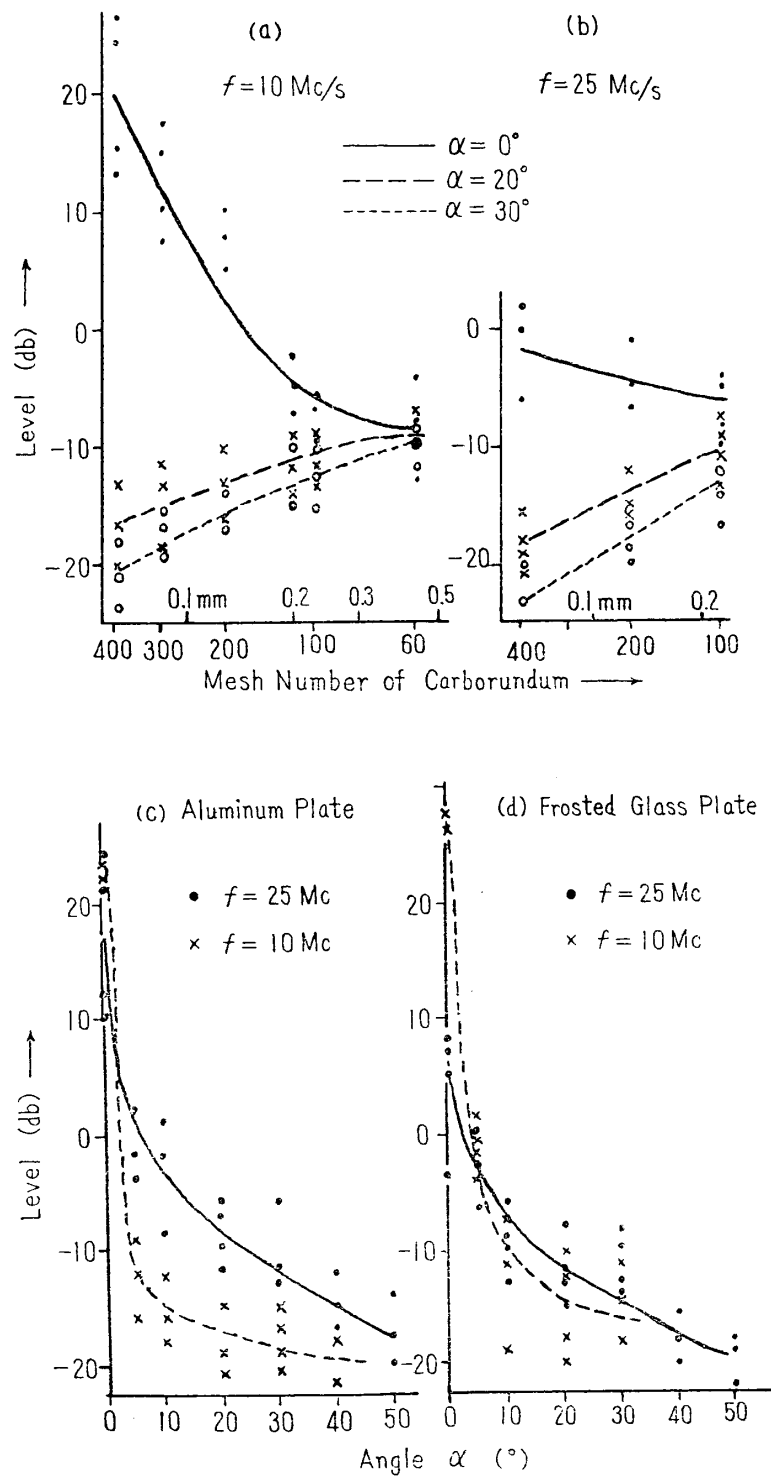


Fig. 12. Intensity of reflected waves from several reflecting surfaces.

らべて入射角による反射強度の変化が少ない事がわかる。粒度が小さくなるにつれて、その変化が急激になり、特に $0^\circ \sim 10^\circ$ の範囲ではその差が著しい。この測定は sea bias error のシミュレーションを行なうための基礎データを得る目的で行なったものである。

4. 2. 移動速度とドプラ周波数との関係

25 Mc, 10 mmφ の送受波器を用いて、 $\varphi=0$ として、 $\rho-f_d$ の関係について、計算値と実験値との比較を行なった。Table 3 [2] にその結果を示すように計算値と実験値とはほぼ一致している。また、別の期日に行なわれた試作ドプラレーダの野外実験 [8] で得られたドプラ信号と本装置の信号とが周波数分析の結果非常に類似している事が確かめられている。

Table 3.

移動速度 V (cm/s)	角 度 ($^\circ$) ρ (ただし $\varphi=0$)	計 算 値 f_d (c/s)	実 験 値 f_d (c/s)
17.1	60	2,850	2,750
7.48	60	1,240	1,290
3.27	60	545	550
1.52	60	253	250
7.48	75	643	620

$V: 7.2$ cm/s
 $f_d: 720$ c/s

$V: 10.5$ cm/s
 $f_d: 1,050$ c/s

$V: 17.1$ cm/s
 $f_d: 1,710$ c/s

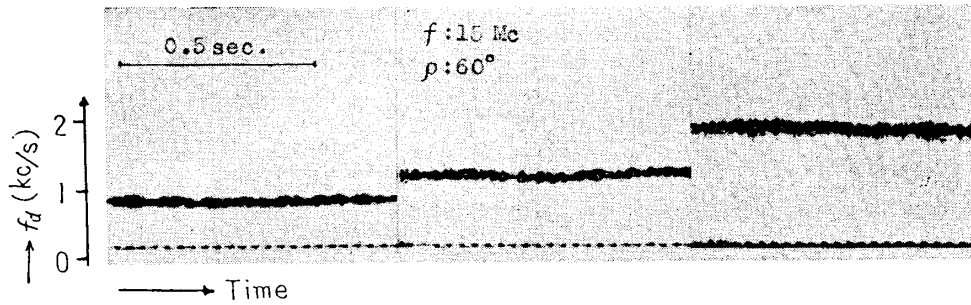


Fig. 13. Sonagram of Doppler signal f_d vs. velocity V .

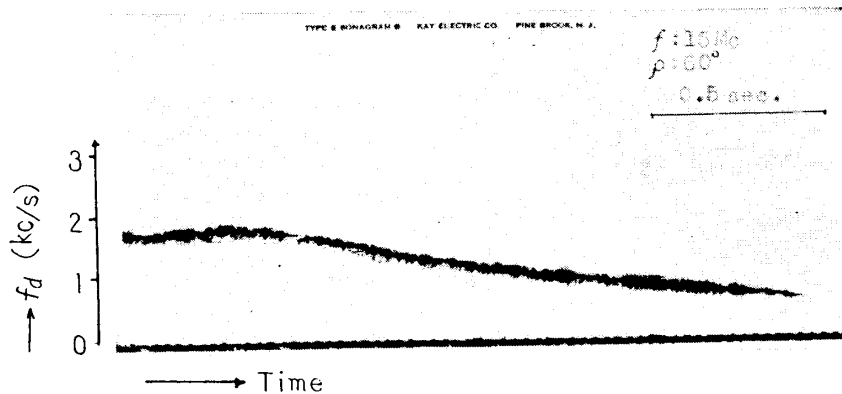


Fig. 14. Sonagram of Doppler signal f_d when velocity decreases.

15 Mc 送受信器を用いて、これとほぼ同様な実験を行なった。使用した送受波器は 20mmφ の水晶振動子を使ったものである。Fig. 13 はこの実験で得られたドプラ信号の sonagram である。Fig. 14 は減速運動の場合に得られたドプラ信号の sonagram である。

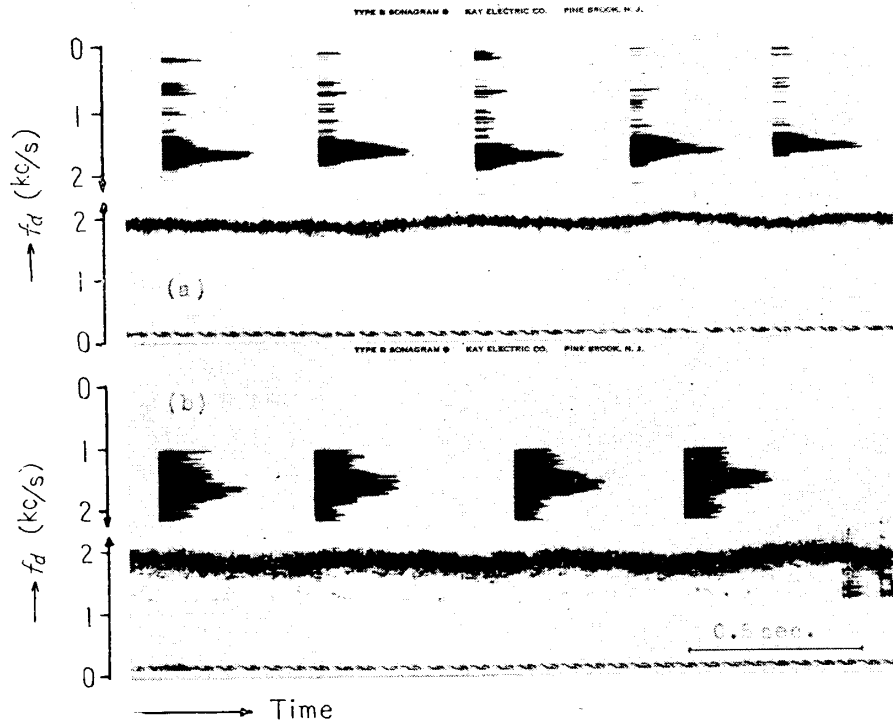


Fig. 15. Sonagram of Doppler signal, showing the cases of (a) narrow and (b) wide beam width.

4. 3. $\Delta\rho$ と f_d の spectrum との関係

15 Mc, 20mmφ ($\Delta\rho$ が小さい) と 3 mmφ ($\Delta\rho$ が大きい) の送受波器を用い、反射物はメッシュ #60 のカーボランダムで反射物の方を移動させた。Fig. 15 (a) および (b) に得られた信号の sonagram を示す。Fig. 15 からわかるように 3 mmφ の送受波器を用いた方が、20 mmφ を用いたものよりもドプラ信号の周波数分布が広い事がわかる。この事を Fig. 16 において説明する。(a) のビーム幅 $\Delta\rho$ と (b) ビーム幅

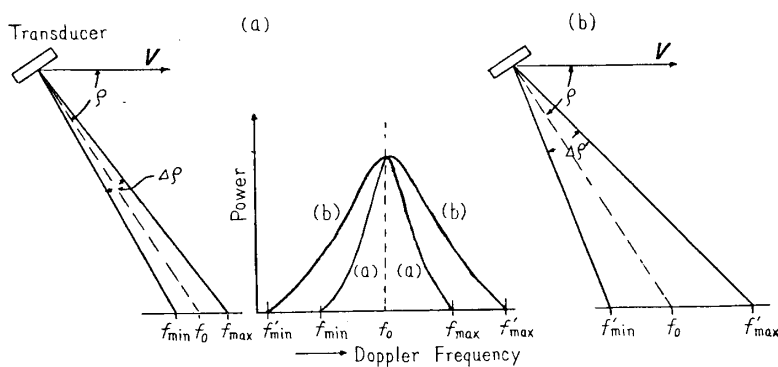


Fig. 16. Relations between Doppler frequency and beam width.

$\Delta\rho'$ の間に次の関係が成立しているものとする。

$$\Delta\rho < \Delta\rho'$$

ここで $Q=f_0/(f_{\max}-f_{\min})$, $Q'=f'_0/(f'_{\max}-f'_{\min})$ とすると

$$Q = \frac{\cos \rho}{\cos(\rho - \frac{1}{2}\Delta\rho) - \cos(\rho + \frac{1}{2}\Delta\rho)}$$

整理して
$$Q = \frac{\cot \rho}{2 \sin \frac{1}{2}\Delta\rho} \tag{16}$$

同様に
$$Q' = \frac{\cot \rho'}{2 \sin \frac{1}{2}\Delta\rho'} \tag{17}$$

Q と Q' を比較すると

$$Q < Q'$$

となる。すなわち ρ および $\Delta\rho$ が大きいほど Q は小さな値をもつことを示す。

4. 4. コーナレフレクタによる実験

前記までのドプラ信号は超音波ビームの照射面内の反射素子の数が多い場合についてシミュレートして来た。ここではそれらの反射体の中に極めて反射の強い部分がある場合のドプラ信号を求めたものである。実際に起り得る例として、ダム、大きな建造物等からの反射によるドプラ信号が考えられる。実用のドプラレーダによるこの例が発表されている [9]。

実験にはガラス板の上に金属板 (9×50×100 mm) を置いてガラス板と金属板の側面で構成される corner を利用した。使用した振動子の指向特性は Fig. 17 に示す。振動子 (送受波器) と反射物との位置の関係は Fig. 18 に示す。図中 $\Delta\rho_1 \sim \Delta\rho_2$ は corner からの反射信号を受信することが出来る超音波ビームの指向角である。

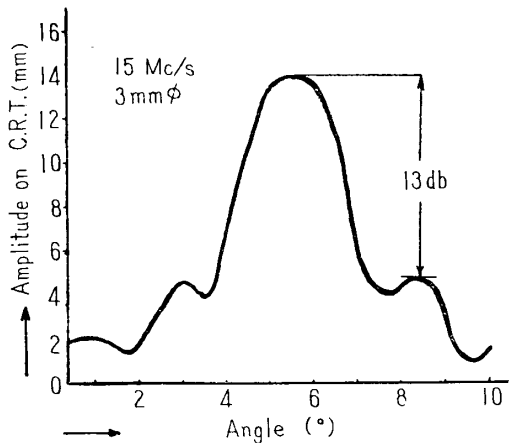


Fig. 17. Radiation pattern of transducer for measuring Doppler effect from a corner reflector.

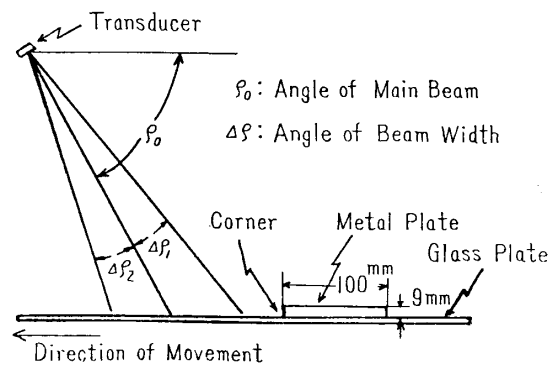


Fig. 18. Relative position of corner reflector and ultrasonic beam.

Fig. 18 で振動子を固定し、反射物をのせてある移動架を左方向に移動した時の反射信号の振幅と、ドプラ周波数の実測例を Fig. 19 に示す。図中 R または r の符号のついている曲線はそれぞれ corner および金属板表面からの反射信号の強度を表わす。これらの曲線の意味を Fig. 18 によって説明する。まず初め $\Delta\rho_1 \sim \Delta\rho_2$ の幅をもつビームがガラス板の

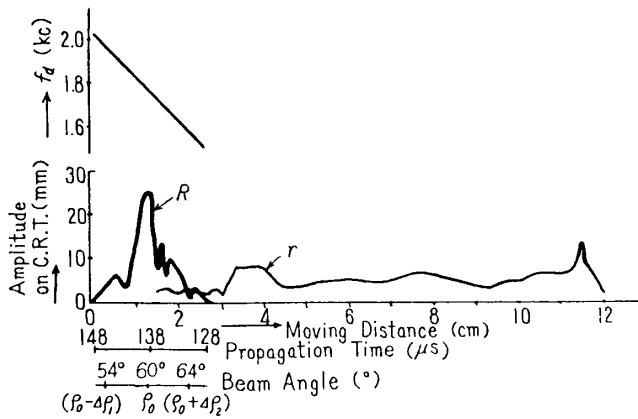


Fig. 19 Doppler signals from a corner reflector.

ると反射信号は最大となる。それ以後は反射信号は減少していき $\Delta\rho_2$ のビーム部分を corner が過ぎると零となる。途中超音波ビームが corner を過ぎ金属板表面に当ると、この部分からも反射信号が受信される。これが r で示した曲線である。 R と r は伝播時間が異なるので区別出来る。 Fig. 19 中の伝播時間およびビーム角度は R について求めたものである。 Fig. 20 はこの時のドプラ信号の sonagram である。 図中 f_{dmax} は $\Delta\rho_1$ のビーム部分の corner からの反射で得られるドプラ周波数、 f_{dmin} は $\Delta\rho_2$ のビーム部分の corner からの反射で得られるドプラ周波数、 f_{d0} は金属板表面から主として ρ_0 のビーム部分の反射で得られるドプラ周波数である。 それぞれの値は (2) 式にもとづき次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} f_{dmax} &= \frac{2Vf}{v} \cos(\rho_0 - \Delta\rho_1) \\ f_{dmin} &= \frac{2Vf}{v} \cos(\rho_0 + \Delta\rho_2) \\ f_{d0} &= \frac{2Vf}{v} \cos \rho_0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

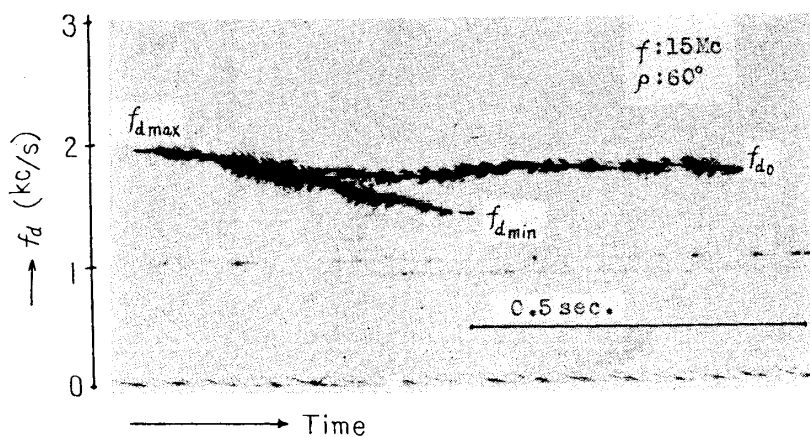


Fig. 20. Sonagram of Doppler signal from a well reflecting target.

みを照射している場合は、振動子方面への反射が非常に小さいので受信される信号強度はほぼ零である。

移動架を左方向に移動し、超音波ビームの $\Delta\rho_1$ の部分に corner の一部が当たると、初めて弱い反射信号が得られるようになる。この位置を Fig. 19 の移動方向の目盛で零点とする。更に移動していくと次第に反射信号の振幅は増して、主ビーム ρ_0 の部分に corner が当

Table 4. Doppler signal from a well reflecting target

(18) 式の値	ρ	(18) 式による 計算値 f_d c/s	sonagram による	
			実験 1	実験 2
$f_{d \max}$	$\rho_0 - \Delta\rho_1$ 53°55'	2,103	1,990	2,010
$f_{d \min}$	$\rho_0 + \Delta\rho_2$ 63°58'	1,570	1,560	1,480
f_{d0}	ρ_0 59°50'	1,795	1,800	1,790

$$f=15 \text{ Mc/s}, V=17.5 \text{ cm/s}, v=1,470 \text{ m/s}$$

Table 4 は (18) 式から求められる f_d と sonagram から求めた f_d をと比較したものである。

顕著な反射物の散在する地表面からのドプラ信号は Fig. 19 に示したような信号が複雑に組み合わさったものであろうと考えられる。

5. 結 言

機上ドプラレーダの超音波シミュレータを試作した。またこれを用いて実際に航空機上で得られると思われるドプラ信号の性質を知るために一連の実験を行なった。

4.1. では反射素子が一様に分布している状態での反射特性を測定し、反射素子が小さい場合には入射角が 0~約 10° 内で極めて急激な反射強度の変化を示す事がわかった。この事は sea bias error が、ビーム方向角度 ρ および $\Delta\rho$ (ビーム幅) によって変る事を示している。

4.2. では移動速度 V とドプラ周波数との関係が計算値と良く一致する事を確めた。またドプラ信号の周波数スペクトラムがある幅をもつ事がわかった。

4.3. ではビーム幅によってドプラ信号の周波数スペクトラムの幅が変る事を示している。すなわち、ビーム幅 $\Delta\rho$ が大きくなる時、スペクトラムの幅が広がる事がわかった。また解析的な方法で説明される結果と一致する事を確め得た。

4.4. では、ダム、ビル等からのドプラ信号を知るために実験を行ない、極めて強い反射体が散在する地域 (例えば都市など) でのシミュレーションの方法について見通しを得た。

以上の一連の実験で超音波シミュレータで得られた信号のもつ周波数スペクトラムの分布状態や周波数成分が、試作したドプラレーダによる移動実験で得られたドプラ信号とよく似ていることが確められ、シミュレータとして利用出来る事を知った。

なお、本研究を行なうに当って本所岡田教授、計測部の諸氏に種々御討論いただいたことを厚く御礼申し上げる。また装置の製作に御協力をいただいた本所エレクトロニクス・ショップの諸氏、株式会社東京計器製造所に御礼申し上げる。

1961 年 11 月 7 日 計 測 部

参 考 文 献

- [1] 岡田・丹羽・ほか：機上ドプラレーダの研究，ほか，昭和35年電気4学会連合大会報告。No. 1808, 1960/7.
- [2] 丹羽・佐下橋・今村：機上ドプラレーダ用超音波シミュレータ。昭和35年電気4学会連合大会報告。No. 1812, 1960/9/26.
- [3] 岡田・丹羽・東口：Airborne Doppler Navigator について。電気通信学会航空電子機器研究専門委員会報告，1960/9/26.
- [4] 岡田・丹羽・東口：電気通信学会航空電子機器研究専門委員会報告，1960/9/26.
- [5] 丹羽・佐下橋・今村：超音波による Airborne Doppler Radar Simulator について，電気通信学会超音波研究専門委員会資料。1960/11/21.
- [6] 丹羽・佐下橋・今村：機上ドプラレーダ用超音波シミュレータ（第2報）。昭和36年電気4学会連合大会報告，1961/4.
- [7] M. Okada, N. Niwa: "A Simulator for Doppler Radar Using Ultrasonic Waves." The Third International Convention of Three Institutes of Navigation at Düsseldorf. 16th~18th May 1961.
- [8] 岡田・丹羽・田宮・東口研究室：機上ドプラレーダ用試作送受信機と野外実験，本集報 p. 538.,
- [9] Ben R. Gardner: Doppler Navigation and Tracking. Proc. I.R.E. Dec. 1960, p. 2016-7.