エアクッションを用いた振動軽減の動作実験

下 井 信 浩*・古 賀 修一郎*・伊 藤 幸 二*
飯 高 不二男*・篠 田 芳 明*

Vibration Reduction Study with Air-Cushion

Nobuhiro SHIMOI*, Shuichiro KOGA*, Kohji ITOH*,
Fujio IITAKA* and Yoshiaki SHINODA*

Among the types of sensors currently used for detecting objects buried underground are the radar types such as microwave pulse sensors, FM-CW and CW sensors as well as magnetic types.

However, since these sensors are housed in caster or tire type frames, vibrations resulting from the ground surface conditions in transporting as well as operating these devices produces a marked effect on their detection characteristics.

For this reason, in investigations performed with the commonly used FM-CW radar, the noise of signals reflected from the ground surface due to vibrations increases and the task of processing images from the signals reflected off of the target object becomes difficult.

In this paper, we propose the use of a housing structure for sensors based on an air-cushion method as one means for overcoming such problems. With this method, the angle between the sensor and ground surface as well as the antenna position can be kept fixed which is an effective way of preventing detection signal weakening due to noise from vibrations.

We also verify the effectiveness of this method with basic experimentation and discuss the results of our study of the characteristics of antenna position stability and vibration in the detection of buried objects.

Key Words: underground buried object detectors, air-cushion, sensor stabilization structures

1. ま え が き

地下埋設物等の探査に使用するセンサとして、マイクロ波 FM-CW, CW, パルス方式によるレーダセンサ及び磁気センサ等が研究されている^{1)~3)}。

レーダセンサは、マイクロ波を地中に照射して埋設物からの反射信号をアンテナで受信し、埋設物の存在の有無を表示するものである。また、磁気センサは地磁気のゆがみ等により、強磁性体(金属が主)に対して、存在の有無を表示するものである。

これらのセンサでは、地表面と送受信アンテナの距離及び角度の変化、または振動等が埋設物の存在の有無に大きな影響を与えることが判明している^{3),4)}。

しかし、現状ではタイヤ及びキャスタ方式でセンサの重量を支える搭載機構を採用しているために、地表面の凹凸に連動した大きな振動の防止及び、アンテナと地表面の距離を一定に保つことはかなり困難である。

地下埋設物等の調査時には、破損し易い埋設物の保護が重要であるにも拘わらず、埋設物探査センサがキャスタ及びタイヤ方式の搭載機構であるために、調査地域の地表面を土木機械等により滑らかに整地して、測定の容易化を図る必要が生じる。このため、整地時の衝撃や探査時の振動により地下埋設物が破損する恐れがある。また、ガス管の破損箇所等のような陥没の危険性がある箇所においても、測定用センサの全重量をキャスタ等で地表面の局所に加えた状態で探査を実施しているために、探査器材の安全、更には測定者の安全性を確保できない等の問題点がある。

以上のような問題は、エアクッション方式を応用したセンサ搭載機構を使用することにより解決できると考えられる。更に、危険物及び爆発物等の調査地域においては、このセンサ搭載機構にリモートセンシング用の遠隔操縦装置を結びつけることにより、測定者が直接危険地域に入ることなく、安全な場所からの探査も可能となる^{3)~5)}。

本論文では、地下埋設物探査時の探査性能の向上、安全化及び省人化を図るための一手段として、エアクッションによるセンサ保持機構を検討し、従来方式と新方式の高度保持特性や振動特性等に関して述べる。

* 防衛庁技術研究本部 相模原市淵野辺 2-9-54

* TRDI, JDA, Sagami-hara
(Received March 11, 1996)
(Revised November 5, 1996)

2. センサ保持原理の検討

2.1 地表面の凹凸

地下埋設物の探査性能に影響を与える外部的な要因として地表面の凹凸振動が考えられる。埋設物探査センサをキャスト及びエアクッション方式のセンサ搭載機構に乗せた場合、振動工学ハンドブックによれば⁶⁾、非舗装道路における凹凸パワースペクトル ($P_N(n)$) は、進行方向に対する不規則変動量であり、下記の式で求められる。

$$P_N(n) = an^{-1.5} \quad (1)$$

ただし、 $a: 300 \times 10^{-6} (\text{m}^3/\text{個})$

$n: (\text{個}/\text{m})$

車両速度が $V(\text{m/s})$ である時、この凹凸の時間に関するパワースペクトルは次式で求められる。

$$P_V(f) = 1/V \cdot P_N(f/V) \quad (2)$$

ただし、 f : 地表面凹凸の時間周波数

2.2 センサに及ぼす影響

地表面の凹凸振動が、埋設物探査用センサに対してどのように影響されているか、CW 方式の電波センサを使用して測定した場合を例として検討する。Fig. 1 のモデルで示されるように、アンテナからの送信波は地表面で反射されることにより減衰するとともに、地中を進行するに従いさらに減衰される。探査目標物まで到達した送信波は反射して地表に返ってくる。この結果、受信アンテナには、地表面からの反射波と探査目標物から返ってきた反射波とが合成された状態で受信される。即ち、ノイズを小さくして探査目標物からの反射波を大きく得るためには、センサの高度変化をいかに小さく保つか、探査性能向上の大きな要因となる。

この関係を探査目標物からの受信電力式で表すと、次の式で近似できる^{7)~10)}。

$$P_{TM} = \frac{\lambda^2 G^2 S_M}{4\pi^3 h_M^4} \cdot P_T [L_{01} L_{10} L_S \cdot e^{-4ah_M}] \quad (3)$$

ただし、 $h_M = h + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r}}$

ただし、

P_{TM} : 探査目標物からの反射電力

S_M : 探査目標物の有効反射面積

P_T : 送信電力

h : 地表面からアンテナの高度

ϵ_r : 地中の比誘電率

λ : 波長

G : アンテナゲイン

D : 探査目標物の地中深さ

h_M : アンテナから埋設物までの距離

L_{01} : 送信アンテナと大地の結合損失

L_{10} : 受信アンテナと大地の結合損失

L_S : 地中における散乱損失 (通常は $L_S=1$)

α : 地中の減衰定数

従って、(3)式に示されるように、探査目標物からの反射電力 (P_{TM}) は、アンテナから地表面までの高度変化 (h) に著しく影響される。また、探査目標物からの有効な反射電力を得るためには、センサの設計仕様から、地表までの距離は地表面の反射波をキャンセルすることが可能な 2.5 cm 以内に保つことが必要とされる。

2.3 センサ保持原理の解析

振動特性を解析するために、等価振幅及び等価振動数を求めた。求める条件として、振動スペクトルは狭帯域、瞬時の加速度値は正規分布すると仮定した。

加速度の瞬時値の確率密度分布は次式で近似することができる。

$$P_A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \text{EXP}\left[-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

ただし、 a は加速度の瞬時値であり、 σ はパワースペクトルより次式で求められる偏差である。

$$\sigma^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S(\omega) d\omega \quad (5)$$

一方、振動スペクトルが狭帯域であることから、振動のピークはレイリー分布となり、

$$P_p = \frac{A_p}{\sigma^2} \text{EXP}\left[-\frac{A_p^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

この時の等価振幅 (μ^2) 及び等価振動数 (ν) は次式で表すことができる。

$$\mu^2 = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_0^\infty S(\omega) d\omega \quad (7)$$

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\int \omega^2 S(\omega) d\omega}{\int S(\omega) d\omega}} \quad (8)$$

(1), (2), (4)~(8)式により求められた結果を Fig. 2 に示す。この時のパラメータは、Fig. 3 の走行コースにおいて、Fig. 4 に示すセンサ保持機構 (エアクッション方式の外形寸法は $100 \times 100 \times 55 \text{ cm}$ 、重量 160 kg) を使用し、時速 0.6 km で車両を走行させた時のシミュレーションに基づくものである。また、キャスト方式 ($120 \times 120 \times 60 \text{ cm}$ 、重量 160 kg 、標準圧タイヤ) も同様の試験方法で実施したと想定した。この結果、キャスト方式とエアクッション方式によるセンサ保持

Fig. 1 Positional relationship of antenna and target object

(a) Caster

(b) Air-cushion

Fig. 2 Analytical results of the oscillation (Caster and Air-cushion)

Fig. 3 Running course and power of altitude sensor

Fig. 4 Basic configuration of air-cushion system

機構の振動を解析結果から比較すると、エアクッション方式では振幅をキャスタ方式に比べ約 1/2 に軽減していることが判明した。

3. 試験方法及び結果

3.1 試験装置

Fig. 4 に試験装置を示す。制御車両は、矢印方向に移動し地下埋設物の探査を開始する。実用機は制御車両をセンサ搭載機構に乗せて探査することが可能である。

また、制御車両に取付られたエンコーダは測定距離と埋設物の位置計測に用いられ、探知目標物が調査領域のどの地点に埋設されているかを、探査画像として発見位置と共に記録することが可能である。そして、センサ搭載装置であるエアクッション方式による埋設物探知センサの高度保持及び地表面の凹凸面との対応特性等は、スカート形状及び構造により決定される⁵⁾。

このため、Table 1 に示すスカート形状及び送風方式を検討した結果、スカートは分割型が有効であり、断面形状として袋付き延長フィンガー型を前後に使用、また延長フィンガー型を左右に使用することが、地上用エアクッションに最も適していることが判明した。

3.2 浮上及び走行試験

送風圧力と浮上高度の関係を Fig. 5 に示す。エアクッション方式のセンサ保持機構特性から、地表面との高度を任意の高さで制御することは、浮上曲線の立ち上がり部分の T 点

Table 1 Skirt shapes and characteristics

Comparison Items		Production Costs	Air Maintenance	Unlevel Surface Mobility	Running Characteristics
Skirt Shape					
Single Unit (Back type)		◎	×	×	×
Finger method	Extended method	○	◎	○	◎
	Simple method	○	○	○	○

◎: excellent, ○: fair, ×: poor

(変動幅が大)を使用するために困難である。しかし、P点(センサの探查性能を維持するための限界高度)付近で高さ保持を実施する場合は、風量の変化に対して安定した高度を維持することが可能であることがわかる。

センサ保持機構の浮上及び走行特性試験に際し、エアクッション本体での高度、内部圧力、加速度を計測するため、圧力室の内部に各測定器を固定して計測を実施した。Table 2に使用した計測器の諸元を示す。

Fig. 6 にエアクッションの必要水平移動力を示す。

エアクッション方式のセンサ保持機構に搭載センサ重量を変化させることにより、水平移動のための送風量変化につい

Fig. 5 Relationship between floatation altitude and blast pressure of air-cushion system

Table 2 Measurement device specifications

Sensor Name	Number	Specifications
Altimeter	4	ultrasonic measurements, frequency 200 kHz, range 10~30 cm
Manometer	9	ceramic-type pressure sensor, 0~200 mmAq
Accelerometer	1	piezoelectric component sensor, frequency 1 Hz~20 kHz, acceleration 0.07~100 G

Fig. 6 Necessary horizontal displacement power of air-cushion

て測定した結果、この図が示すように整地面上の水平移動は重量に関する依存性が少なく、かつ重量に比して小さな動力で移動が可能であった。しかし、不整地(約 6.5 cm のうねり)における水平移動力は整地に比して約 3~5 倍の力を必要とすることが測定された。

次に、Fig. 6 の測定コースにおいて、人工的な凹凸面(角材及び土盛り)を乗り越える時の高度センサの出力を測定した。高度センサが凹凸面の最上部に達した時、エアクッションがセンサを安定な高度に維持しているために、高度センサの出力は地表面高さを反転した出力パターン(高度センサはエアクッションから地表面に向けて測定しているために地表面の突起物の高度が低い)で表示されている。本図から本方式の安定性が示されている。なお、この時の走行速度は 0.9 km/h、上下振動加速度は 0.1~0.4 G であった。

送風機用の原動機や電源ノイズの測定信号に対する影響を調べるため、浮上させない状態における振動加速度測定を実施した。(振動スペクトル Fig. 7-a) この結果、ファン回転時による 22 Hz の振動と電源周波数の 60 Hz の振動が計測されたが、測定値に直接影響を与える大きさではないため、地下埋設物探査時には影響がないものと考えられる。

また、走行時の振動加速度測定(振動スペクトル Fig. 7-b)の結果によると、エアクッションのスペクトルには、空力振動としての約 100 Hz の卓越周波数が測定された。

(a) Noise power spectrum (on stopping)

(b) Noise power spectrum (on traveling)

Fig. 7 Noise power spectrum of vibration acceleration measurement (On stopping and on traveling)

Fig. 8 Detection signal of passive magnetic sensor (without buried target)

Fig. 9 Detection signal of passive magnetic sensor (with buried target)

整地面を走行する場合と地表凹凸面を乗り越える場合の振動加速度の相違は、整地面走行の場合、探査性能の低下に影響する数 Hz 以下の振動パワースペクトル値が小さい。

しかし、地表凹凸面を乗り越えるときの振動パワースペクトル値は低周波成分が高くなると同時に空力振動も大きくなっている。

3.3 埋設物探査比較試験

本試験に使用した埋設物探知センサは、マイクロ波 CW センサ及び磁気センサであり、探知信号が走行距離と共に記録できるように準備した。Fig. 8 はエアクッション方式と従来のキャスト方式のセンサ保持機構に磁気センサを搭載し、埋設物なしの状態で計測した結果を示す。キャスト方式は4輪で支持されているために、地表の凹凸面により大きく影響を受け、エアクッション方式では平均化された地面の凹凸に追従している結果が得られた。この結果、エアクッション方式の有効性が認められた。

また、直径約 20 cm の鉄製円盤及び直径 5 cm のプラスチック円盤に鉄画鋲を埋めた物で深さ 10 cm に埋設した探査結果を Fig. 9 に示す。図の A 点に見られるように、両方式とも鉄製円盤については、大きな探知信号が得られている。

Fig. 10 Microwave CW sensor measurements

しかし、プラスチックに鉄画鋲を付けた埋設物の場合(B 点)は、キャスト方式において探知信号とノイズの区別が困難であったが、エアクッション方式の場合には探査信号が得られているのが理解できる。

Fig. 10 にマイクロ波 CW センサを搭載した測定結果を示す。キャスト方式の場合約 6 cm 高さのうねりを乗り越える時、高度変動が大きく、搭載したセンサのアンテナが揺れることからノイズ信号が測定されている。また、鉄製円盤の埋設物探査においては、その存在を示す強い探査信号が得られており判定が容易であるが、プラスチックに鉄画鋲を取り付けた埋設物については、ノイズが大きく、探査が困難であった。

一方、エアクッション方式では、うねりを乗り越える際の高度変動はほとんどないため、本方式においては凹凸面による高度変動を吸収していることが判明した。

4. 考 察

4.1 地表面圧力

本試験に使用したセンサ保持機構(センサを含む総重量は約 200 kg)をキャスト方式で保持した場合、地表面にかかる車輪毎の接地圧力は次のように見積もられる。

$$P_T = 200 \text{ kg} / 4 \times 50 \text{ cm}^2 = 1 \text{ kg/cm}^2 \quad (9)$$

一方、エアクッション方式で保持した場合の接地圧力は同様に

$$P_A = 200 \text{ kg} / 200 \times 200 \text{ cm}^2 = 0.005 \text{ kg/cm}^2 \quad (10)$$

となる。

この結果、キャスト方式の場合は約 200 kg のセンサ保持機構を接地圧力として地表面にそのまま加えるために、破損しやすい遺跡調査や危険物の探査等には困難が予想される。しかし、エアクッション方式は地表面への接地圧力をかなり軽減することが可能である(キャスト方式に比し 1/200)ため、上記のような調査には好適であると考えられる。更に、キャスト方式は、地表面の凹凸の影響、即ち振動や個々のキャストへの重量の偏りによる接地圧力の上昇が生じるが、エアクッション方式では圧力の等方分散性から圧力変動はほとんどなく、低接地圧力を必要とされる地域の探査に適していることが明らかになった。

4.2 エアクッション方式の振動特性

エアクッション方式の振動原因には下記の項目が考えられる。

- (1) 送風機からの送風振動
- (2) 地表面の凹凸による応答振動
- (3) スカート部の空気流動振動

送風機からの送風振動は、原動機の回転倍数に等しい周波数で計測されるが、その振動数は一般に数十 Hz での風量の変動を伴うものである。これは、Fig. 4 に示したエアクッション方式の浮上特性からも理解できるように、使用範囲が高度保持の安定点であることから、高度変動への影響が少ないものと考えられる。次に、地表面の凹凸を乗り越える時の応答振動は、車両速度が遅く低周波であるために高度の変動に影響するものと考えられる。

本試験に用いたエアクッション方式のセンサ保持機構は、走行速度 1 m/s において分割型のスカートが約 20 cm 幅で取付けてあることから、約 5 Hz の地表凹凸面への応答が推定される。実際の整地面においても、この推定された周波数帯での振動加速度が測定された。なお、より大きな凹凸面については(1)式から地表面のスペクトル値の減少が期待され、エアクッション浮体のスカートによる応答性が減少することから高度変動も減少すると思われる。

スカート部の空力振動についても、加速度センサで測定されたことから、その高度維持に対する影響を検討した。振動の特徴とした加速度パワースペクトル(Fig. 7-b)が約 100 Hz の狭帯域であるため、振幅幅を 10 Hz として振幅(A)を概略値で計算すると下記の式により求めることができる。

$$A = \sqrt{(1 \times 10^{-6}) \times 980.7 / (2\pi \times 100)^2 \times 20\pi} \\ = 0.001 \text{ (cm)} \quad (11)$$

ただし、(11)式の右辺は順にパワー値(G^2/ω)、重力加速度、角周波数、及びベクトル幅である。

また同様に、走行中測定された 1 Hz 付近での振動の寄与は次式で求められる。

$$A = \sqrt{(4 \times 10^{-8}) \times 980.7 / (2\pi \times 1)^2 \times 20\pi} \\ = 0.31 \text{ (cm)} \quad (12)$$

(11)、(12)式より求められた 2 周波の比較から空力振動による加速度は大きい、高度変動への寄与は少ないと考えられる。

最後に、エアクッション方式の振動特性として、上記の各振動源を総合した等価振幅及び等価振動数を考察した。

(1)、(2)、(4)式から(8)式に Fig. 7-b) のパワースペクトル値を代入して解析した結果、1 例として、センサ荷重 100 kg、走行速度 0.6 km/h、センサ高度 5 cm 時による等価振幅及び等価振動数を求めた。この値から、エアクッション方式による振動特性は振幅幅約 1.28 cm、振動数で約 3.9 Hz であることが得られた。この結果から、センサ保持機構の振動をセンサの探知性能に影響を与える振幅幅約 2.5 cm 以内(実験で使用したマイクロ波センサの地表面反射波キャンセル範

囲による)に抑えることが可能となり、エアクッション方式によるセンサ保持機構の有効性が確認でき、またキャスト方式のセンサ搭載機構よりも振動を軽減できることからセンサの性能を向上させることに有効であると思われる。

5. むすび

地下埋設物探査用センサの保持機構として、エアクッション方式を検討した結果、以下のことが明らかになった。

(1) エアクッション方式は、従来キャスト方式に比べ地表面への接地圧力を軽減し、埋設物等の崩壊を防ぐことに有効である。

(2) 地表面の凹凸から生じるノイズを軽減し、磁気センサ、マイクロ波センサ等の探査性能を向上させることが可能である。

(3) 埋設物探査における地表凹凸面の影響による評価方法を確立することができた。

尚、今回検討したエアクッション機構の振動特性、地表面の凹凸・探査性能の高度依存特性等を総合的に評価し、更にセンサ保持機構の改善を図る計画である。

参考文献

- 1) D. L. Mensa: High Resolution Radar Cross Section Imaging, Artech House, 63/66 (1991)
- 2) 村沢, 西崎, 上牟田, 木村, 小原: 3 アンテナ素子を有する地中埋設物探査レーダ, 三井造船技報, No. 152 (1974)
- 3) 地球環境の新しいリモートセンシング特集号, 岩波研究所技報, 22, 121 (1976)
- 4) 石井古徳: リモートセンシング読本, オーム社 (1981)
- 5) 三野正洋: 小型ホバークラフトハンドブック, ファンパード (1977)
- 6) 谷口 修: 振動工学ハンドブック, 養賢堂, 1127 (1981)
- 7) 山下榮吉: 応用電磁波工学, 近代科学社, 187/191 (1992)
- 8) 山口, 三本, 川上, 仙石, 阿部: 合成開口 FM-CW レーダによる物体の検出, 電子情報通信学会論文誌(B II), J 74-B II, 413/420 (1991)
- 9) M. Sasaki, M. Suzuki, T. Matsumoto, K. Fujino, and T. Kawamura: Stratigraphic images of snowpack obtained by an FM-CW microwave system, Proc. of ISAP, 1045/1048 (1989)
- 10) Y. Yamaguchi, Y. Maruyama, A. Kawakami, M. Sengoku, and T. Abe: Detection of objects buried in wet snowpack by an FM-CW radar, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 29-2, 201/208 (1991)

[著者紹介]

下井 信 浩 (正会員)

1992 年放送大学工学部産業技術学科卒業, 1996 年信州大学工学博士, 1988 年防衛庁入庁, 現在ロボット技術の研究及び地下埋設物探査の研究に従事。日本ロボット学会等の会員。