直達音と地面反射音を利用する 少素子ジオフォンアレイによる土中音源位置測定

川岸 卓司¹・善甫 啓一²・水谷 孝一³・若槻 尚斗⁴・川村 洋平⁵

¹ 学生会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: kawagishi@aclab.esys.tsukuba.ac.jp

² 非会員 筑波大学博士研究員 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: zempo@aclab.esys.tsukuba.ac.jp

³ 正会員 筑波大学教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: mizutani@iit.tsukuba.ac.jp

⁴ 非会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: wakatuki@iit.tsukuba.ac.jp

⁵ 正会員 Curtin Univ., Lecturer WASM, Dept. Mining Eng. (Kalgoorlie, WA6433)
E-mail: Yohei.Kawamura@curtin.edu.au

本稿は土中で発生する音源の位置測定法に関するものである。提案手法では、直達音だけではなく、地表面からの反射音も利用することで測定精度の向上を図っている。地表面で起こる反射音を利用するために、鉛直方向に一对の素子を配置した杭状のジオフォンを用いている。杭状ジオフォンアレイを2本（素子数：4）用いた評価実験の結果、位置推定精度は直達音のみを使用する従来手法と比べ3.42倍と向上することがわかった。また、ジオフォンアレイの配置や構成する素子のずれが音源位置の推定に与える影響を実規模シミュレーションにより実験し、提案手法の位置推定精度は従来手法に比べ最大で14.6倍に向上できることを確認した。以上より、従来手法に比べ高精度の音源位置測定が可能であることが示された。

Key Words : Sound Source Localization, Direction of Arrival, Geophone Array, Reflected Sound

1. 諸言

現在のインフラ整備では水道管やガス管、電線の埋設が盛んに行われており、新規施工だけでなく耐久年数の過ぎた配管の交換のため埋設部分のすべての舗装や地面を開削する工法が一般的となっている¹⁴⁾。しかし、この工法は作業中の道路封鎖が必要であり、開削から埋設まで工期が長くなることから、新たな工法として誘導式水平ドリル工法が提案されている⁵⁶⁾。この工法は、地上にドリル本体を設置し、ドリル先端で配管の埋設予定の地中のみの掘削を行うため、開始地点である発進坑と終了地点である到達坑のみを開削すればよい。そのため、図-1のように、埋設部のすべて舗装や地面を開削する必要がないので、道路封鎖や工期の短縮ができる。一方、この工法はドリル先端の正確な位置を管理することが重要であり、現在はドリル先端内部に電磁波発生器を設け、その電磁波を直上のロケータで受信し推定する手法が用いられている。しかし、土中で電磁波が減衰してしまう場合や直上に構造物や川がありロケータを設置できない場合には推定できない問題がある。そこで、電磁波に比

べ減衰が少ない音響的手法を用いて直上以外から推定する手法が検討されている。

地中における音響的手法として、トンネル掘削などで自己位置を推定するための位置計算手法^{7,8)}や音波を用いた地中映像化^{9,10)}、ドリル先端位置の推定法¹¹⁾などが検討されている。位置計算手法や地中映像化では対象が動かないため、音波の送受信を行い推定することができるが、誘導式ドリル工法では先端部が常に移動しておりリアルタイム計測が必要とされる。ドリル先端位置の推定法では地表面上に複数のジオフォンを設置し、ドリル先端部で発生する破砕音を音源として、音波の到来時間差を用いて音源位置を推定するリアルタイムな手法である。しかし、17個のジオフォンを約10 m²に設置し、各ジオフ

図-1 誘導式水平ドリル工法の施工概念図

オンの位置を正確に測定する必要があることから、少数かつ測定容易な手法が望まれている¹²⁾。そこで本研究では、ドリル先端部の直上から離れた位置に設置した2本の杭状ジオフォンアレイによってドリル先端で発生する破砕音の位置を推定する手法を提案する。杭状ジオフォンアレイは2つのジオフォンで構成され、本手法では2本のジオフォンアレイを2箇所の縦穴に差し込み、それぞれのジオフォンへの音波の到来時間差を基に音源位置を推定する。本手法では、音源からジオフォンに直接受信される直達音だけではなく、地表面からの反射音を考慮した計算を行うことにより音源位置を推定する¹³⁾。

本論文は、全5章で構成されている。第2章では地表面反射を活用した音源位置の推定原理を述べる。第3章では実際の土中において提案手法と従来手法を実験で検証し、2本の杭状ジオフォンアレイに対する位置推移精度を検証する。第4章ではシミュレーションにより実規模での地表面反射を活用した提案手法の有効性について検証する。第5章は結論である。なお、本論文では、ベクトルを一重下線、行列を二重下線として表記する。

2. 土中における音源位置測定法の原理

本研究では、ドリルの先端部で発生する破砕音はインパルス性であることが知られていることから¹⁴⁾、インパルス信号を音源信号として各ジオフォンの受信信号の到来時間差を求める。著者らは、少素子構成のマイクロフォンアレイによる直達音および反射音のそれぞれの到来時間差を推定する手法や到来時間差による音源位置測定法を開発してきた¹⁵⁻¹⁸⁾。本稿では、少素子で構成されたジオフォンアレイを作成し用いることで、地中を伝わる音波が地表面で反射する反射音を利用する土中の音源位置測定法を提案する。以降は、2本のジオフォンアレイを構成する4つのジオフォンを素子と表記し、必要に応じ素子番号を用いる。本手法は、各素子間の到来時間差を相互相関法^{19, 20)}によって求め、本研究で提案する計算手法を用いてその音源位置の測定する。

(1) 相互相関法による到来時間差計算法

本研究では、音波伝搬は音線理論²¹⁾に基づくとする。音線理論では、対象とする音源の波長が地表境界面の凹凸より十分大きい場合には、反射面を平面境界とみなし鏡面反射が起こるものとして計算できる。粘土質の土中を対象とした場合、音速は約1,500 m/s、伝搬する音波は1 kHz以下の低周波成分であることから波長は約10 ~ 1,000 mであり、地表面の凹凸が約 $1.0 \times 10^2 \sim 3.0 \times 10^2$ mとすると波長は地表面凹凸に比べ十分に長いとして扱え

図-2 素子0、素子1と音源の音波伝搬経路

図-3 音源信号と受信信号の到来時間関係

る。本稿では、音源と各素子間の経路において音速一定と仮定し到来時間差を計算する。一対のジオフォンアレイを地中埋設した際の音源と素子間の音波伝搬経路を図-2に示す。地表面と素子1との距離を L_B 、素子0-1間の距離を L_E とする。音源の位置 $\underline{D} \equiv^t (x, y, z)$ とすると、音源で発生した音波はまず素子0に到来する。この時刻を基準とすると、音速 c とすると、同一の音波は到来時間差 τ_{d1} で素子1と $c\tau_{d1}$ の距離差をもち受信される。地表面で反射した音波は同様に素子1に $c\tau_{r1}$ の距離差で到来し、素子0に $c\tau_{r0}$ の距離差で受信される。音源がジオフォンアレイより下部にある場合、各到来時間差は

$$\tau_{d1} < \tau_{r1} < \tau_{r0} \quad (1)$$

の関係となる。ここで、各素子への受信信号は図-3のように示される。音源の信号を $\phi(t)$ とすると、素子0、素子1の受信信号 $s_0(t)$ 、 $s_1(t)$ は、式(2)、(3)で示される。

$$s_0(t) = \phi(t) + \phi(t - \tau_{r0}) \quad (2)$$

$$s_1(t) = \phi(t - \tau_{d1}) + \phi(t - \tau_{r1}) \quad (3)$$

ここで、2つの素子の受信信号の時間差を相互相関法によって計算する。相互相関法では、2つの信号の類似度を相互相関関数 $R(t; s_0, s_1)$ を求め、時間差に相当する時間位置にピークが現れる。式(1)より図-4のような関係となる。

図-4 相互相関関数の例

よって、ピークの時間位置を検出することで各素子の到来時間差 $\tau_{d1}, \tau_{r1}, \tau_{r0}$ が得られる。ここで素子0を基準とし、もう一対のジオフォンアレイを考慮すると、素子2, 素子3に到来する受信信号 $s_2(t), s_3(t)$ は、式(4), (5)で示される。

$$s_2(t) = \phi(t - \tau_{d2}) + \phi(t - \tau_{r2}) \quad (4)$$

$$s_3(t) = \phi(t - \tau_{d3}) + \phi(t - \tau_{r3}) \quad (5)$$

各素子間の相互相関関数を計算することで、二対のジオフォンアレイの各素子に対する直達音, 反射音の到来時間差 $\tau_{d1}, \tau_{d2}, \tau_{d3}, \tau_{r0}, \tau_{r1}, \tau_{r2}, \tau_{r3}$ が求められる。

(2) 到来時間差による位置測定アルゴリズム

a) 提案手法

到来時間差と音速から各素子と音源の距離を計算できる。まず図-2の一対のジオフォンアレイが z 軸上($x=0$)に位置するとき、素子0, 素子1の座標を $\underline{m}_0 (= {}^t(0, 0, -L_B - L_E)), \underline{m}_1 (= {}^t(0, 0, -L_B))$ とすると、素子0と素子1の地表に対する虚像の座標は、 $\underline{r}_0 (= {}^t(0, 0, L_B + L_E)), \underline{r}_1 (= {}^t(0, 0, L_B))$ となる。音源の座標系と直達音, 反射音の距離差から

$$\|\underline{m}_0 - \underline{D}\| = l \quad (6)$$

$$\|\underline{r}_0 - \underline{D}\| = l + c\tau_{r0} \quad (7)$$

$$\|\underline{m}_1 - \underline{D}\| = l + c\tau_{d1} \quad (8)$$

$$\|\underline{r}_1 - \underline{D}\| = l + c\tau_{r1} \quad (9)$$

と示される($\|\cdot\|$ はベクトルのノルムを表す)。ここで、

図-5のように二対のジオフォンアレイをアレイA($x=0$)とアレイB($x=L_A$)とすると、アレイA($x=0$)が式(6)-(9)のとき、アレイB($x=L_A$)も同様に素子2, 素子3は $\underline{m}_2 (= {}^t(L_A, 0, -L_B - L_E)), \underline{m}_3 (= {}^t(L_A, 0, -L_B))$, 仮想的な座標を $\underline{r}_2 (= {}^t(L_A, 0, L_B + L_E)), \underline{r}_3 (= {}^t(L_A, 0, L_B))$ の距離差から、

$$\|\underline{m}_2 - \underline{D}\| = l + c\tau_{d2} \quad (10)$$

$$\|\underline{r}_2 - \underline{D}\| = l + c\tau_{r2} \quad (11)$$

$$\|\underline{m}_3 - \underline{D}\| = l + c\tau_{d3} \quad (12)$$

$$\|\underline{r}_3 - \underline{D}\| = l + c\tau_{r3} \quad (13)$$

 図-5 ジオフォンアレイと地面、音源の位置関係
(素子2,3への伝搬経路の図示は省略)

と表される。未知数を x, y, z, c として整理すると以下の関係が成り立つ。

$$\underline{T} \cdot \begin{pmatrix} x \\ z \\ cl \end{pmatrix} = \underline{L} \quad (14)$$

ここで $\underline{T}, \underline{L}$ は、

$$\underline{T} = \begin{pmatrix} 0 & 2L_E & 2\tau_{d1} & \tau_{d1}^2 \\ 2L_A & 0 & 2\tau_{d2} & \tau_{d2}^2 \\ 2L_A & 2L_E & 2\tau_{d3} & \tau_{d3}^2 \\ 0 & 2(2L_B + 2L_E) & 2\tau_{r0} & \tau_{r0}^2 \\ 0 & 2(2L_B + L_E) & 2\tau_{r1} & \tau_{r1}^2 \\ 2L_A & 2(2L_B + 2L_E) & 2\tau_{r2} & \tau_{r2}^2 \\ 2L_A & 2(2L_B + L_E) & 2\tau_{r3} & \tau_{r3}^2 \end{pmatrix},$$

$$\underline{L} = \begin{pmatrix} L_E^2 \\ L_A^2 \\ L_E^2 + L_A^2 \\ (2L_B + 2L_E)^2 \\ (2L_B + L_E)^2 \\ L_A^2 + (2L_B + 2L_E)^2 \\ L_A^2 + (2L_B + L_E)^2 \end{pmatrix}.$$

ただし、 $l = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - L_B - L_E)^2}$ である。ここで式(14)に、 $\underline{T}$ の擬似逆行列 $\underline{T}^+$ を左からかけると、

$${}^t(x \ y \ cl \ c^2) = \underline{T}^+ \cdot \underline{L}, \quad (15)$$

となり、音源位置 $\underline{D}$ を求めることが可能となる。ここで、 $y|l = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - L_B - L_E)^2}$ より導出される。

b) 従来手法の比較

提案手法と比較する従来手法として、地表面にセンサを配置する従来法との比較を行う¹⁾。この手法は、音源から各素子の直達音のみの到来時間差を基に音源位置測定を行う。比較において、提案手法と同一素子数(4素子)を用いると、未知数を x, y, z, c の4つであるとする解を得ることができない。このため、音源が既知であ

る地点から受信信号を得ることにより音速 c を事前に計測し、未知数は音源座標である x, y, z とすることで音源位置を求める。また、提案手法と従来手法の評価基準として、原点から音源の真位置までの距離 l_{True} と原点から測定された位置までの距離 l_{Est} より測定誤差率 η を求める。

$$\eta = \frac{|l_{\text{True}} - l_{\text{Est}}|}{l_{\text{True}}} \quad (16)$$

3. 評価実験

(1) 実験条件

実際の土壌で提案手法の評価実験を行った。また、地表面に素子を配置する従来手法との比較をした。実験の概要図を図-6に示す。実験環境の土質は固い粘土質で、実験付近は約10 m 四方に亘り概ね同様の地質であった。音源となる地点を掘削し、その音源位置をハンマーで加振し信号を発生させた。音源位置を $\underline{D} \equiv (0.20, 1.00, -0.70) \text{ (m)}$ とし、埋設するジオフォンアレイは圧電式の素子(H1a; AQUARIAN)を用いて作成したものを使用して、 $L_E = 0.20 \text{ m}$, $L_A = 0.25 \text{ m}$, $L_B = 0.15 \text{ m}$ の地点に埋設した。収録には、PC (Sony, VAIO PCG-791N) と Analog-Digital コンバータ (National Instruments, USB-6212) を用いた。また予備実験として、図-6 のように音速測定実験を行った。地表面から0.30 m の深さに2つの素子を1 m の間隔で埋設し、0.5 m 離れた側面から加振させ伝搬時間を測定した結果、音速は $c = 1,637 \text{ m/s}$ であった。以下、音速はこの値を用いる。また、アレイ上部に埋設した素子が受信する環境雑音によるエイリアシングの影響を考慮し、サンプリング周波数を96 kHzとした。音源位置を、10 秒間に5 回の加振し、これを20 回繰り返し計100 サンプルを得た。比較対象である従来手法では、素子0を原点とし、すべての素子を地表面状に $L_E = 0.20 \text{ m}$, $L_A = 0.25 \text{ m}$ の間隔で設置した。到来時間差の推定時には、素子間の距離に応じた時間閾値を設定し、その範囲以外の値については除外し、結果にはその平均値を使用した。

(2) 実験結果と考察

表-1 に、提案手法および従来手法の推定値、表-2 に真値からの誤差を示す。推定の結果、提案手法では y 軸方向の測定誤差が最も大きく+4.08 m となり、従来手法では z 軸方向の測定誤差が最も大きく-11.86 m となった。また、提案手法での音速推定の結果 1,505 m/s となった。各軸方向に対する誤差の原因として、素子の配置が考えられる。提案手法の素子の配置面は x - z 平面の配置とな

図-6 実験の概要図

表-1 推定された音源位置

	$x \text{ (m)}$	$y \text{ (m)}$	$z \text{ (m)}$	$c \text{ (m/s)}$
Proposed method	0.15	5.08	-0.11	1505
Conventional method	0.26	1.58	-11.86	-
True Value	0.20	1.00	-0.70	1637

表-2 音源位置と推定位置の誤差

	$x \text{ (m)}$	$y \text{ (m)}$	$z \text{ (m)}$	$c \text{ (m/s)}$
Proposed method	-0.05	+4.08	-0.69	-132
Conventional method	+0.06	+0.58	-11.16	-
True Value	0.20	1.00	-0.70	1637

* Bold characters: maximum value of error

り、従来手法は x - y 平面の配置となっている。このため音源から各面で受信する信号の到来時間差を十分に推定できていないことが原因であると考えられる。4つの素子を同一平面上に設置する場合には、その素子面の法線軸方向の音源からの各素子の到来時間差に対応するサンプル数の間隔が広くなるため位置推定精度が他軸に比べ低下すると考えられる。しかし、直達音だけでなく反射音も利用する提案手法の誤差は、従来手法に比べて小さいことが分かる。この原因として素子を地表面に設置する従来手法では、多くの素子を用いることで到来時間差の誤差を補間していたが、少数素子の場合には補間ができず、誤差がそのまま結果に影響することが考えられる。これに対して、提案手法では未知数の導出に疑似逆行列を用いて7つの式から4つの解を推定していることから y 軸方向への到来時間誤差をより正確に推定が可能となっていると考えられる。また、提案手法および従来手法は共に、それぞれの素子の位置関係から音源位置の測定を行うため、これらの素子の位置を正確に配置することが重要であると考えられる。測定誤差率を比較すると、提案手法 $\eta_p = 2.35$ に対し、従来手法 $\eta_c = 8.03$ であり、提案手法は従来手法に比べ 3.42 倍の精度で位置測定可能であることが確認された。

(3) まとめ

提案手法と従来手法を評価するため、実際の土中で評価実験を行った。実験の結果、提案手法は従来手法に比べ3.42 倍の測位精度を有することがわかった。また、4つの素子のみを用いた測定法では、素子で構成される面の直行する方向に対して分解能が低いことがわかった。実規模を想定した場合、素子間隔の長距離化が必要となるとともに、それぞれの構成する素子位置の設置誤差が位置測定誤差に影響することがわかった。

4. 実規模シミュレーション

評価実験より、4つの素子による手法では、提案手法および従来手法ともに素子の構成する面（素子構成面）に対して測位分解能が低いことがわかった。また、素子設置時の誤差が測定結果に影響を与えることから、音源の深さをHDD工法でのドリル先端深さを考慮して10 mとして2つの実験を行った。素子構成面の測位誤差を考察するため、音源の方向を正面方向から側面方向まで音源の角度を変化させ位置測定結果の比較を行った。また、提案手法および従来手法ともに最も誤差が小さくなる方向に対し、素子の1つの位置を移動させた場合における、素子の位置誤差が与える音源位置の測定精度への影響について比較を行った。

図-7 信号の周波数特性

表-3 実験条件

L_E	2.0 m
L_A	2.5 m
L_B	2.0 m
Radius	2.0 m
Depth of the sound source	10.0 m
Sampling frequency	96 kHz
Sound velocity	1,500 m/s

(1) シミュレーション条件

位置測定シミュレーションのシミュレーション条件について表-3 に示す。音源には約4 m離れた地点から加振した際に受信した音源の周波数特性と近似したガウシアンパルス音源を使用した。図-7 に受信した信号周波数及びシミュレーションで用いた音源を示す。なお、振幅については、表示のために正規化した値を用いた。音源には中心周波数を320 Hzのガウシアンパルス信号を用いた。

(2) センサ構成面に対する実験と考察

実験の概略図を図-8 に示す。評価実験と同様の配置として、提案手法を x - z 平面の配置として従来手法を x - y 平面とした。この際、各素子を評価実験の10 倍の間隔とし、音源位置を深さ10 mのまま θ を0 から90 度まで変化させた。各角度に対して受信信号から音源位置を測定し、提案手法と従来手法の各座標軸における真値との誤差を求めた。図-9 にその結果を示す。

a) 各座標軸の誤差

図-9 の x 軸誤差については、提案手法の誤差は従来手法に比べ少なく一定であるが、従来手法については75-90 度までが最大誤差10 m 程度となり、75 度以前については0.5 m 以下の誤差となっている。誤差が最大となった83 度付近について、 y 座標は-0.25 m と誤差は小さいものであった。その要因として、 y 軸方向に2つの素子が音源に対し正面となることで、3つの到来時間差から座

標を推定する従来手法において2つの到来時間差が同一の値となり、解が不安定となったことが考えられる。解が不安定となった理由として、従来手法の解の計算についても、提案手法の音速が既知である場合における行列式を解く計算を行っていることが考えられる。同様の理由から、 x 軸方向に2つの素子が音源に対し正面となる7度付近で誤差が大きくなった。提案手法については、 y 軸方向に2つの素子が音源に対し正面となる約83度で誤差が最大となるがその誤差は y 軸方向で約0.5 m程度であり、提案手法は従来手法に比べ2つの素子が音源に対し正面となる方向に対しても誤差が小さいと考えられる。

b) 測定誤差率及び音速

測定誤差率及び提案手法で求めた音速の値について図-10に示す。提案手法の測定誤差率は0-75度付近まで $\eta_P = 0.12$ 以下の誤差率であった。従来手法は35-40度付近で誤差率が $\eta_C = 0.10$ 以下となった。しかし、従来手法は素子構成面に対して2つの素子が音源の正面となる7度および83度付近で誤差率は最大となった。誤差率の低い角度での比較するため平均測定誤差率として、20度から70度の測定誤差率の平均値を算出すると、提案手法が $\eta_P = 0.0115$ であり、従来手法は $\eta_C = 0.0182$ であった。よって、平均測定誤差率においても、提案手法は従来手法に比べ1.58倍の精度で位置測定可能であることが確認された。また、提案手法による音速推定については素子構成面に対し音源が正面に位置する80-90度付近を除き、音速を正しく推定できることがわかった。

c) まとめ

素子構成面に対する音源方向の測定位置誤差について検証し、提案手法は0-75度付近で測位誤差が小さく、従来手法では35-40度付近で最も測位誤差が小さかった。これは、素子構成面が音源に対して法線軸方向に位置する場合を除き、各素子に対する音源からの伝搬経路長が長くなる分だけ、到来時間差を比較的正確に計測できることから誤差が低減されていると考えられる。この際、提案手法は従来手法に比べ1.58倍の精度で位置測定可能であることが確認された。よって発生する音源に対し、適切な素子構成面を考慮することで、位置測定ができることが示された。また提案手法では、音速の推定も80-90度を除き可能であることがわかった。

(3) 素子の設置誤差に対する実験と考察

前項の実験と同様の配置で従来手法と提案手法における素子の設置誤差について比較した。この際、提案手法と従来手法ともに誤差が少ない35度において、素子0を y 軸方向に0から0.10 mまで0.01 m刻みに移動させた。これにより、1つの素子の設置誤差が音源位置測定に与える誤差について考察した。実験の概略図を図-11に示す。この際、提案手法では素子1つの直達音及び反射音の受

図-8 実験の概要図

図-9 各座標軸における測位誤差

図-10 測定誤差率と推定音速

信号が遅延することとなり、他の素子への受信信号は前項の実験と同様の値を受信信号として計算した。なお、それぞれの素子の配置および35度における音源の位置、音速については前項の実験と同様の値を用いた。

a) 各座標軸の誤差

図-12 に各座標軸に対する音源位置との測位誤差について示す。提案手法では、各軸ともに最大で0.7 m 程度であった。従来手法では、素子位置の誤差が音源位置の測定精度に与える影響が大きく、x 軸方向に12.2 m, y 軸方向に8.1 m, z 軸方向に13.4 m の音源測位誤差が素子設置位置誤差に対し、ほぼ線形に増加した。これは、従来手法が4 つの素子に対して発生する3 つの到来時間差をもとに位置測定 (x, y, z) を行うため、1 つの素子の到来時間差の誤差が位置推定に直接影響することが原因と考えられる。提案手法では、7 つの到来時間差から4 つの未知数 (x, y, z, c) を求めるため、1 つの素子の位置ずれによって起こる2 つの到来時間差の誤差を平均化し、推定結果の誤差を抑えることになる。

b) 測定誤差率及び音速

図-13 に素子の設置位置に誤差を与えた場合の測定誤差率および音速の推定結果について示す。従来手法では素子の設置位置誤差0 m のとき測定誤差率は $\eta_c = 0.13$ であり、設置位置誤差0.1 m のとき測定誤差率 $\eta_c = 1.32$ であり、音源測位誤差は10 倍以上大きくなった。これに対し提案手法の音源測位誤差は、誤差0 m のときに測定誤差率は $\eta_p = 0.12$ であり、素子の設置位置誤差が最大の0.10 m のときに最小値の $\eta_p = 0.09$ となり、提案手法の位置推定精度は従来手法に比べ14.6 倍向上することがわかった。提案手法において測定誤差率が減少した理由として、図-12 の y 軸方向の誤差は負方向から正方向に増加しておりその絶対値は誤差0 m のときから減少していることから結果として測位誤差を低減していることがわかった。また、音速の結果については、誤差の最大値が約+30 m/s となり図-10 の音速最大誤差と同程度の誤差が推定された。よって1つの素子を-y 軸方向に位置誤差を与えた場合、音速に与える影響が大きくなることがわかった。

c) まとめ

本実験では、提案手法と従来手法ともに誤差が少ない35度において、素子0を-y 軸方向に0 から0.10 m まで0.01 m 刻みに移動させ、1つの素子の位置誤差が音源測位に与える誤差について考察した。実験の結果、従来手法では、素子の位置誤差に比例して音源位置の測定精度が低下し誤差が10 倍程度となった。これに対し、提案手法では-y 軸方向への素子位置誤差に対して音源測定精度に大きな影響はない一方、音速の推定値に与える影響が最も大きくなりその誤差が+30 m/s であることがわかった。

図-11 提案手法及び従来手法の素子設置位置誤差の与え方

図-12 各座標軸における測位誤差

図-13 素子位置誤差を与えた測定誤差率と推定音速

その結果、提案手法は従来手法に比べ素子の設置位置誤差が音源の位置測定に与える誤差が小さいことがわかった。

5. 結言

本論文では、地表面反射を利用した土中の音源位置推定法について述べた。杭状のジオフォンアレイを用いることで、反射波の検出を可能とした。実際の土中における評価実験の結果、直達音のみの時間差を用いる従来法に比べ、提案手法は3.42倍の音源位置測定誤差の低減ができることがわかった。また、素子が構成する素子構成面方向に対する影響を考察するため、実規模シミュレーションを行った。その結果、提案手法は従来手法に比べ0-75度の広範囲で音源測位誤差が小さく、ともに誤差が小さい20-70度における平均測定誤差率においても従来手法とくらべ1.5倍低減できることがわかった。

音波の到来時間差を用いる本手法は、素子の設置位置誤差が音源位置の測定精度に影響を与える。この影響を考察するため、1つの素子の設置位置誤差が音源測位に与える誤差を評価するために、素子0をy軸方向に0から0.10 mまで0.01 m刻みに移動させてシミュレーションを行った。その結果、従来手法では、素子の設置位置誤差が音源位置測定に直接影響を与え誤差が大きくなるのに対し、提案手法では、素子の設置位置誤差が音源位置測定に与える誤差が小さく、最大で14.6倍の音源測位誤差を低減できることがわかった。これにより、少素子ジオフォンアレイと地面反射を用いる本手法は、従来手法と同素子数の場合、誤差を低減して音源位置測定が有効性が示された。しかし、実際の土質では地表面からだけでなく地層や埋設物から反射音が観測されてしまうことや土の含水率が本測定に与える影響を考慮する必要がある。よって、今後は土中の音波伝搬特性を考察するとともに、実際のドリルビットの掘削音源を解析することにより、音源の特徴を考慮した位置測定法について検討することで、さらなる位置測定精度の向上を目指す。

参考文献

- 1) 国土交通省：下水道長寿化支援制度に関する手引き，2009.
- 2) 国土交通省：電気通信設備工事共通仕様書，2011.
- 3) 経済産業省：ガス安全高度化計画，2011.
- 4) 厚生労働省：施工方法，給水装置の構造及び材質基準に関する省令，1997.
- 5) HDD推進委員会：HDD(誘導式水平ドリル)工法の適用標準とそれを超える施工事例，No-Dig Today, No. 73, pp. 81-84,

2010.

- 6) 西川真午，篤海 政志：誘導式水平ドリル工法(HDD工法)の管更生への適用性について，下水道研究発表会講演集，Vol. 41, pp. 675-677, 2004.
- 7) 宮崎裕道，近藤高弘，蜂谷弘之：土中音波による位置探査システムの開発，土木学会第 64 回年次学術講演会，VI-145, pp. 289-290, 2009.
- 8) 松本三千緒，山上順民，蜂谷弘之：土中音波による位置探査フィールド実験，土木学会第 64 回年次学術講演会，VI-146, pp. 291-292, 2009.
- 9) 陶良，渡邊勉，本岡誠一：クロス型送・受波器アレイを用いた地中埋設物の 3 次元映像化，日本音響学会誌，Vol. 60, No. 12, pp. 727-734, 2004.
- 10) 杉本恒美，川崎拓：遺跡・遺構のための横波音波を用いた地中映像化の検討，IIC-REVIEW, No. 45, pp. 3-10, 2011.
- 11) Junpei Tamura, Youhei Kawamura, Hidemi Mochiji, Naoto Sasaki, Koichi Mizutani, and Hirokazu Okawa : A Method for Estimating the Location of the Drill-Bit During Horizontal Directional Drilling Using a Giant-Magnetostrictive Vibrator, Jpn.J.Appl.Phys.50, 07HC15, 2011.
- 12) 和田洋：非開削による配管埋設技術の高度化，建設の施工企画，No. 658, pp. 15-20, 2004.
- 13) 谷口慶祐：地震波を用いた地下構造の推定に関する実験の実践例，京都教育大学環境教育研究年法，Vol. 13, pp. 131-144, 2005.
- 14) J.W.Rector and B.P.Marion : The use of drill-bit energy as a downhole seismic source, GEOPHYSICS, Vol. 56, No. 5, pp. 628-634.
- 15) 吉永弘志，水谷孝一，若槻尚斗：“搜索活動の支援を目的とした高騒音環境での音源探査手法,” 土木学会論文集 F6, Vol. 67, No. 2, pp. I-11-I-16, 2011.
- 16) Keiichi Zempo, Tadashi Ebihara, and Koichi Mizutani : Direction of arrival Estimation Based on Delayed-Sum Method in Reverberation Environment, Jpn. J. Appl. Phys., 51, 07GB09, 2012.
- 17) 川岸卓司，善甫啓一，水谷孝一，若槻尚斗，川村洋平：“地面反射を利用した土中の音源位置推定,” 土木学会，2013 年度土木情報学シンポジウム講演集，Vol. 38, pp. 39-40, 2013.
- 18) 小木曾里樹，水谷孝一，若槻尚斗，川村洋平：“加速度センサ・ジャイロセンサを用いた推進工法用ドリルヘッド位置・姿勢の推定手法,” 土木学会，2013 年度土木情報学シンポジウム講演集，Vol. 38, pp. 111-114, 2013.
- 19) 電子情報通信学会，大賀寿郎，金田豊，山崎芳男：音響システムとデジタル処理，東京出版，1995.
- 20) C.H.Knapp and G.C.Cartar : The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay, IEEE Trans. ASSP, Vol. 24, No. 4, pp. 320-327, 1976.
- 21) 久野和宏，野呂雄一，井研治：室内音響における波動論と音線理論の関係，日本音響学会，Vol. 49, No. 2, pp. 77-83, 1993.

(2013. 10. 7 受付)

Estimation of underground sound source position from direct sounds and
reflected sounds from ground surface measured by a small number of geophone array

Takuji KAWAGISHI, Keiichi Zempo, Koichi MIZUTANI, Naoto WAKATSUKI and Youhei
KAWAMURA

Recently, pipes like a water pipe or a gas tube are buried in wide area. Horizontal Directional Drilling (HDD) method is used as a pipe embedding method because the method requires no open cuts. However, the position of the drill-bit in underground is instability, and it must be estimated by extend sensors. We focused on the estimation method using the sound generated by the drill-bit itself. In this study, an estimation method of the drill-bit position using the reflected sound from ground surface as well as the direct sound from the drill-bit is proposed. Although the conventional method, which only uses the direct sound, requires a lot of geophones, the proposed method only requires an array consisting of some geophones. From some experiments in actual soil, it was verified that the proposed method was effective for estimating the position of the drill-bit. As the results, the proposed method enabled to estimate 3.42 times more accurately than the conventional method.