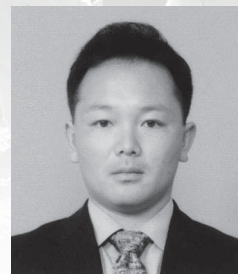


HDD用ドリルヘッド 近傍探査システムの開発と実験施工

中内 啓雅

NAKAUCHI Takaharu

大阪ガス(株)導管事業部導管部
建設技術チーム 副課長



1. はじめに

都市部において非開削工事でガス配管を行う場合、輻輳している地下埋設物の破損を防止することが重要である。

地下埋設物の管路を精度良く確認するため、調査時に試掘による露出確認を原則としているところが少なくない。それらにかかる費用と時間を削減するために、掘削を必要としない電磁誘導波、音波、レーダ(中内ほか、2004)による地上からの埋設物確認方法(写真-1参照)がとられているものの、舗装状況などにより探査できないケースも少なくない。

他方、直径数メートル以上のトンネルを掘削する大型のシールドマシンでは、マシンの先端に圧電素子から構成される音波送受信機を搭載し、埋設物から反射する音波を受信することによりマシン前方の障害物を検知する方法(いわゆる音波探査法)が採用されている(笠ほか、1991)。しかし、例えばポリエチレン管敷設用の誘導式水平ドリル(以下、HDD)のドリル

ヘッドは口径が70mm前後と小さいこともあり、音波送受信機を搭載することは困難である。また、音波の場合は土の不均一性に起因する不要な反射信号が強く、埋設物からの反射信号との識別が難しいといった問題もある。このような背景から、探査深度および分解能において実現の可能性が高く、かつHDD装置先端に搭載するための小型化が可能な技術としてレーダ法に着目し、開発を進めてきた。

ここでは、ドリルヘッドに搭載できる近傍探査システムに要求される目標仕様、レーダシステムの基本設計、さらに試作したレーダシステムの水槽および土槽による性能試験結果について述べる。

2. ドリルヘッド近傍探査システムに要求される目標仕様

HDD用ドリルヘッドは地中でその掘進方向を制御できる機能を有している。したがって、ドリルヘッドの先端に前方の埋設物の存在を検知できるセンサが搭載できれば、埋設物との衝突を回避しながら安全に地中を掘進することができる。

ドリルヘッド近傍探査システムに要求される目標仕様を表-1に示す。(a)は探査に必要とされる性能、(b)はHDD仕様による制約から設定した。

(a) 表-1 目標仕様

探査距離	ドリルヘッド先端から約30cm
検知対象埋設物	金属、非金属管
検知対象埋設管口径	口径25mm以上
分解能	8cm

(b)

ドリルヘッドのサイズ	φ70mm×L600mm
推進スピード	20m/h



写真-1 地表からの埋設物確認例(地中レーダ)

3. レーダシステムの基本設計

地表から電磁波を地中に放射し、埋設管からの反射信号によりその位置を検知する、いわゆる地表走査型レーダでは、送信アンテナからパルス状の電磁波を放射し、受信波形をサンプリング回路により低周波数信号に変換して断面表示する方式（Bスコープ表示）が一般的である。しかし、従来のパルス方式では実効送信電力（単位時間当たりの送信電力量に相当）が低く、かつサンプリング回路の寸法が大きいため、ドリルヘッドに搭載することが困難であった。そこで、ここではこれらの問題を解決するために、新たに小型の高速サンプリングシステムを試作した。以下にその基本設計について説明する。

3-1 使用周波数および帯域幅

まず帯域幅を決定する。信号の帯域幅Bは要求分解能 ΔR で決まり、パルス幅をTとすれば

$$\Delta R = \frac{V \cdot T}{2} \quad (1)$$

である。

ここで、通常（狭帯域パルスの場合）は

$$B = \frac{1}{T} \quad (2)$$

で表せるので

$$B = \frac{V}{2 \cdot \Delta R} \quad (3)$$

となる。

Vを電磁波の地中伝播速度、土壌の比誘電率を ϵ_r とすれば

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

となる。

ただし、 C_0 は光速である。

ここで、先端近傍探査システムに要求される探査分解能は8cmであるので、地中の誘電率 $\epsilon_r=20$ とすれば、(3)式より帯域幅は

$$B = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{20} \cdot (2 \times 0.08)} \quad (5)$$

$$= 419 \text{ (MHz)}$$

となり、約420MHzの周波数が必要である。

一方、使用周波数は

- ・アンテナの大きさ

- ・地中減衰率
- ・必要帯域幅
- ・物標のレーダ断面積
- ・探査距離
- ・最小検出可能電力 P_{min}

を考慮してレーダ方程式から求めることができるが、現在のところ帯域幅および P_{min} 以外は未知である。そこで、帯域幅を考慮して次式により P_{min} を求めておき、経験的に周波数を決定する。

ただし、 k ：ボルツマン定数（ $=1.38 \times 10^{-23}$ (J/K)）、 T_n ：受信機の等価雑音温度、 B_n ：雑音等価帯域幅、 F_n ：雑音指数、 $(S_o/N_o)_{min}$ ：物標検出に必要な最小の出力信号対雑音比である。

$$P_{min} = k T_n B_n F_n (S_o/N_o)_{min} \quad (6)$$

ここで、 $T_n=300$ (K)、 $B_n=420$ (MHz)、

$F_n=5$ 、 $(S_o/N_o)_{min}=10$ とすれば

$$P_{min} = -70 \text{ (dBm)} \quad (7)$$

であるから、物標が検出できるためには、反射信号レベルは(7)式の値以上である必要がある。(7)式の値以上の受信レベルが得られるかどうかを以下で検討する。

まず、帯域幅が420MHzで、アンテナの大きさがせいぜい6cm程度（空中における波長が約12cm）であることを考慮すると、中心周波数は1GHzが適当と考えられる。1GHzにおける粘土混じりの土の減衰率を約50dB/m（中内ほか、1994）であると仮定すると、仮に探査距離を50cmに設定すれば、送信してから受信するまでの総合減衰量は推定で

アンテナ損失（往復）+地中伝播損失+物標による反射損失

$$= 40 \text{ (dB)} + 50 \text{ (dB)} + 20 \text{ (dB)} = 110 \text{ (dB)} \quad (8)$$

となる。ここで、送信電力を19dBmとすれば、(8)式より受信レベルは-91dBmとなり、(7)式より21dB小さい。そこで、その不足分を積分効果で補償することを考える。先端近傍探査システムでは後に述べるように、送信パルスの繰り返し周波数 f_r を、20～12.5MHzと極めて高く設定してある。一方、ドリルヘッドの回転数を60rpm、すなわち1秒で1回転とし、1回転の間に12方位のデータを得ることにすれば、1方位は約80msecの時間をかけることができる。この間に距離方向のサンプル点数を256点とすれば、1点あたりの積分時間 T_I は

$$T_I = 80 \text{ msec} / 256 \div 0.31 \text{ msec}$$

となる。ここで、 $f_r=12.5$ MHzの場合、受信信号のパルス数 n は

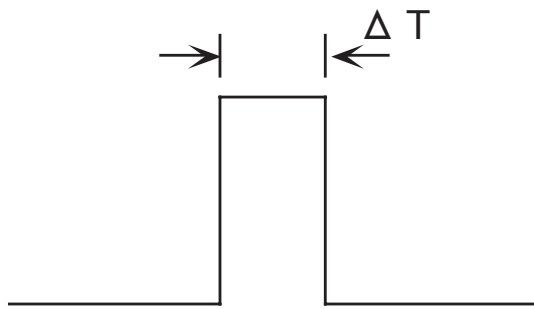


図-1 理想的な矩形波

$$\begin{aligned} n &= 12.5 \times 10^6 \times 0.31 \times 10^{-3} \\ &= 3.91 \times 10^3 \end{aligned} \quad (9)$$

である。

この値をデシベル換算すると36dBとなり、不足分の21dBを補うことができるようになるので、50cm前方の探査が可能となる。ただし、(8)式ではビームの広がりによる損失を考慮していないので、上記の15dBの余裕分はその損失分を補償するために使える。

以上要約すれば、中心周波数1GHz、帯域幅420MHz、分解能8cm、送信出力が19dBm、送信パルスの繰り返し周波数12.5MHzとすれば、最大探査距離として約50cm程度を実現することが可能となる。

3-2 送信波形

インパルスの理想波形を図-1のような矩形波とする。この波形のスペクトルは、図-2のようにパルス幅 ΔT に対して $f_1 = 1/\Delta T$ のところに最初のゼロ点ができる。このようなスペクトルに対して420MHzの帯域幅を確保するためには、 f_1 は1GHz以上が必要である。一方、アンテナの大きさはドリルヘッドの寸法からせいぜい6cm程度であるから、500MHz以下の周波数は著しく帯域制限を受ける。よって、 f_1 はできるだけ高い方がよい。しかし、周波数が高くなると地中での減衰が増加するため、 $f_1 = 1.4$ (GHz) とすれば適当な送信パルスの半値幅は約0.7 nsec程度になる。図-1の波形は理想的な矩形波であるが、実際の波形は図-3のように丸みをおび、広域が低下したパルスになる。

3-3 回路構成と実効送信電力

従来の地中レーダに採用されているサンプリング方式に比べ大幅に実効送信電力を増大させる高速サンプリング方式とした。ここでは、送信パルスの繰り返し周波数を約400倍大きくすることにより、積分効果の向上を図った。その結果、別の実験を通してランダムノイズを9.9dB低減できたことが分かった。

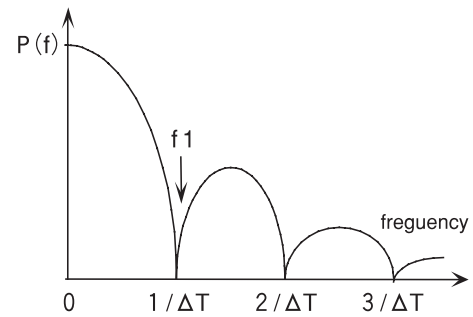


図-2 矩形波のスペクトル

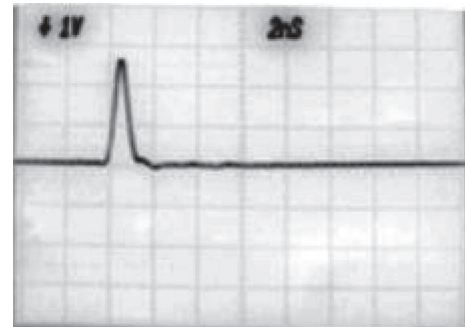


図-3 実際のパルス波形

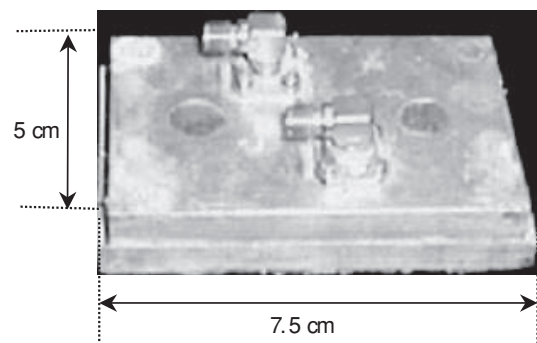


写真-2 微小アンテナの外観

4. 微小アンテナ

口径200mmまでの小口径ガス導管敷設用のHDDに用いられるドリルヘッドは、掘削工事用ボーリングマシンなどの中でも、直径が約7cmと極めて小さい。そこで、アンテナ取付スペースを少しでも広く確保するため、先端の傾斜部分にアンテナを取り付けることにした。この場合、掘進方向のみならず側方も同時に探査できると考えられる。このような微小な寸法のアンテナで30～50cm前方の埋設管が検知可能かどうかを基礎実験で検証するために、写真-2に示す微小アンテナ（縦5cm×横7.5cm×高さ1.5cm）を試作した。

従来の地表走査型レーダのアンテナと異なる特徴は、以下の通りである。

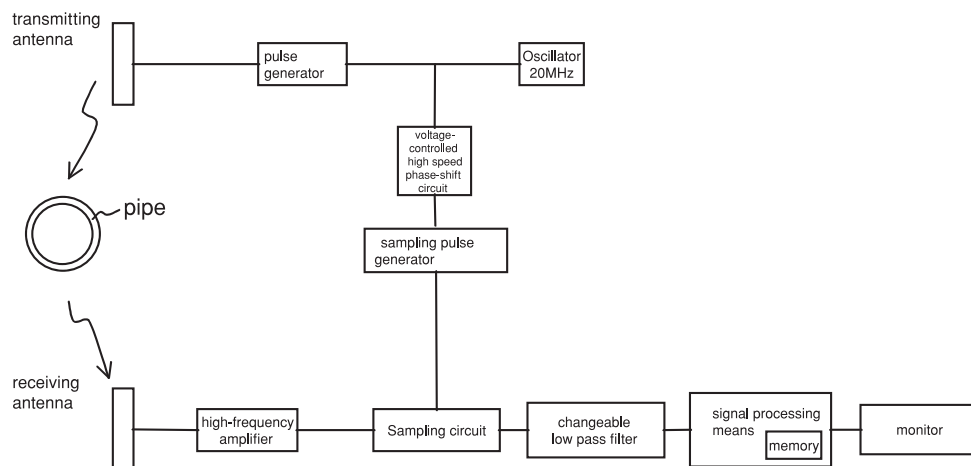


図-4 開発した超小型レーダシステムのブロック図

- ・ボーリング時の振動に対する耐振性を向上するため、筐体内に低い比誘電率のゴム材を充填している。
- ・アンテナが土に密着するので、アンテナ素子を装着する基板材として、比誘電率が高い $\epsilon_r=10$ のガラスエポキシ樹脂を採用した。
- ・アンテナ防護板として耐久性、耐衝撃性のある特殊セラミクス（比誘電率 ϵ_r =約24、厚み5mm）を製作した。

なお、アンテナ素子の形状は、従来と同じボータイアンテナを採用した。

図-4に開発した超小型レーダシステムのブロック図を示す。

5. 実機搭載実験

図-5に実際の工事現場におけるHDDマシンでのポリエチレン管敷設風景を示す。また、HDDマシン

のドリルヘッドに前節のレーダシステムをHDDマシンに搭載した。図-6 (a) ~ (c) にその外観を示す。

(1) 図-7 (a) に示すように、口径150mmの鋼管が埋設されており、その近傍を通過するようにHDDマシンを推進する実験を行った。図-7 (b) は近傍通過時の探査データである。水平位置240cmの位置に埋設管が最も接近し、180cm位置の反射走時13nsecあたりから双曲線状の破線を確認することができる。図-7 (c) は通過後に掘削を行い、ヘッドの状況を確認した様子である。この実験では約60cm手前から模擬埋設管を検知できていたと考えられる。

(2) 図-8 (a) に示すフィールドにおいて、口径100mmの水道用塩ビ管（水で満たされている）が埋設されており、その近傍を通過するようにHDDマシンを推進する実験を行った。図-8 (b) は近傍通過時の探査データである。水平位置160cmの位置で埋設管に最も接近し、120cm位置の反射走時11nsecあたりから直線状の破線を確認することができた。図-

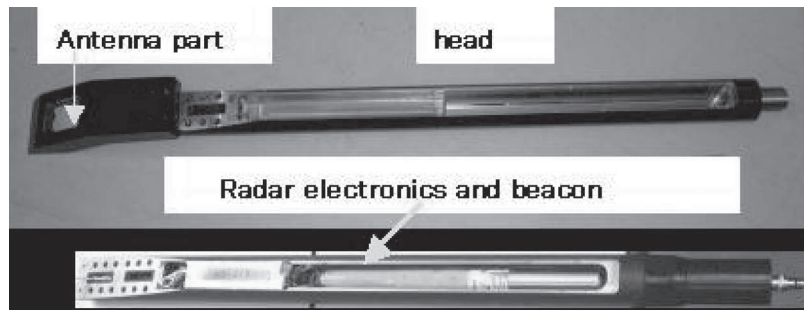


(a) HDDマシン（CASE社製400-TX）



(b) ポリエチレン管引き込み過程

図-5 実際の工事現場におけるHDDマシンでの施工風景



(a) ドリルヘッドに装着された超小型レーダシステム

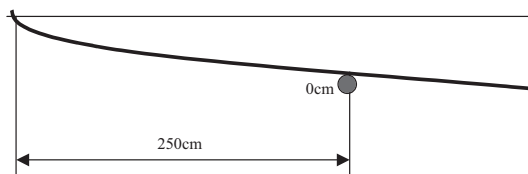


(b) HDDマシン操作風景

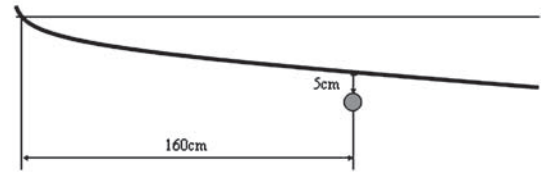


(c) ドリルヘッド先端
(先端傾斜部の長方形部の内面に超小型アンテナが装着されている)

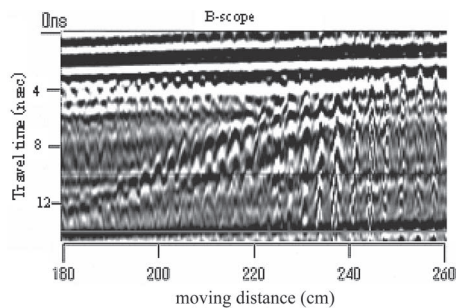
図-6 HDDマシンのドリルヘッドに取り付けられた超小型レーダシステム



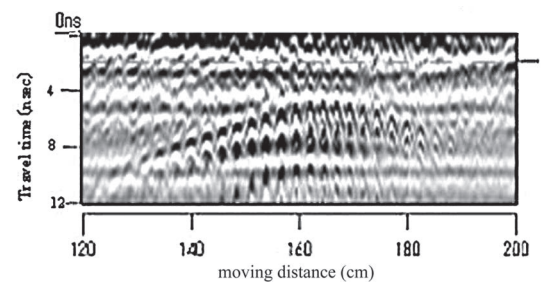
(a) 埋設管とドリルヘッドの位置関係 (断面図)



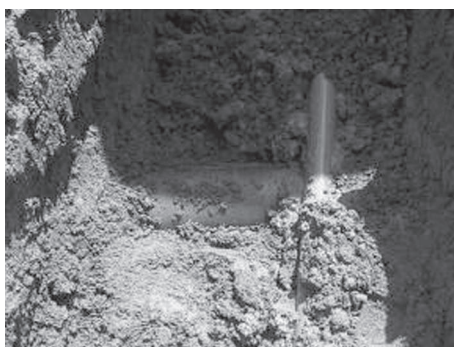
(a) 埋設管とドリルヘッドの位置関係 (断面図)



(b) 超小型レーダでの探査事例 (鋼管)



(b) 超小型レーダでの探査事例 (鋼管)



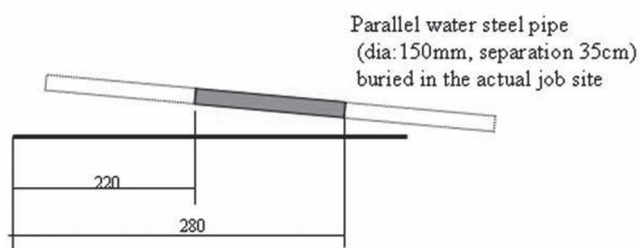
(c) 推進後のドリルヘッド周りの様子

図-7 探査実験結果

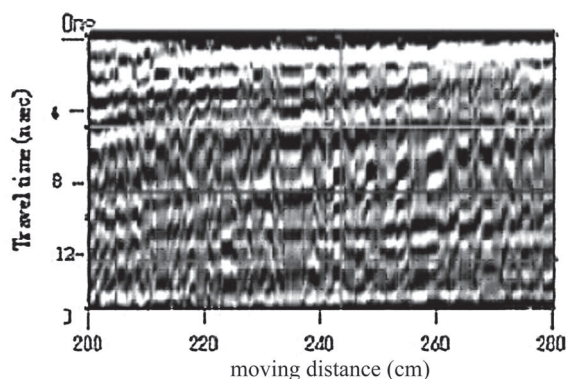


(c) 推進後のドリルヘッド周りの様子

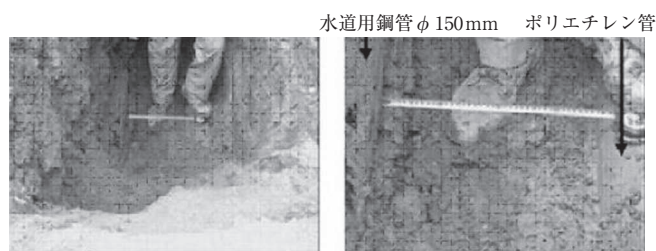
図-8 探査実験結果



(a) 埋設管とドリルヘッドの位置関係 (平面図)



(b) 超小型レーダでの探査事例 (鋼管)



(c) 推進後のドリルヘッド周りの様子

図-9 実施工現場における探査結果

8 (c) は通過後に掘削を行い、ドリルヘッドの状況を確認した様子である。この実験では約40cm手前から模擬埋設管を検知できていたと考えられる。

(3) 図-9 (a) に示す実際のHDD工事現場 (大阪府箕面市稲) において、口径150mmの水道用鋼管が埋設されており、アクシデント的にその近傍を通過した結果を示す。図-9 (b) は近傍通過時の探査データである。水平位置280cmの位置で埋設管に最も接近し、200cm位置の反射走時12nsecあたりから右上がりの直線状の破線を確認することができた。この事例では、引き込みされたポリエチレン管に平行に敷設された水道用鋼管を検知できていたと考えられる。ドリルヘッドの推進に伴い、直線状の破線が徐々に上昇して (反射時間が短くなって) いる。これは、ドリルヘッドが徐々に水道用鋼管に近づいていたためと思われる。図-9 (c) は通過後に掘削を行い、埋設管との離隔状況を確認した様子である。

6. おわりに

都市部において地中をボーリングする際に問題となる埋設物との衝突を回避するため、ドリルヘッドに探査用の小型レーダシステムを搭載し、前方および側方の埋設物を検知する技術について開発した。その結果以下のことが明らかとなった。

- ①超小型アンテナ、超小型レーダ回路を製作しドリルヘッドに搭載可能となった。
- ②サンプリング方式の高速化などにより、従来の探査システムに比べS/N比を改善した。
- ③製作した耐振性アンテナは、振動の激しいHDD施工にも適用可能である。
- ④実際のHDD施工現場において離隔距離30cm程度で埋設物を検知できた。

埋設物との衝突を回避できれば、保安の確保に寄与できると考える。

参考文献

- ・中内啓雅, 早川秀樹, 網崎勝, 岸雅樹 (2004): 大阪ガスの埋設物探査技術, NO-DIG TODAY, No.49, 18-21.
- ・笠博義, 黒台昌弘, 巽治 (1991): 地中前方探査技術の開発 (その1) 音波・レーリー波を用いたシールド機の前方探査に関する実験的研究, 間組研究年報, Vol.1991, 131-141.
- ・中内啓雅, 網崎勝, 早川秀樹 (1994): ボアホールレーダの探査距離の限界に関する理論検討, 物理探査学会学術講演会講演論文集, Vol.94, 秋季, 134-137.
- ・須山憲次, 小薮実男, 中山昇 (1992): 地中探査レーダー (レーダーロケーター) の開発, 日本ガス協会誌, Vol.45, No.10, 95-97.
- ・中内啓雅, 早川秀樹, 網崎勝, 岸雅樹 (1998): 非開削工法前方監視センサの開発, 物理探査学会学術講演会講演論文集, Vol.98, 217-221.
- ・荒井郁男, 鈴木務 (1983): 地中レーダシステム, 電子通信学会論文誌, Vol.J66-B, No.6, 713-720.