

レーダ探査による河床部探査実験

利岡 徹馬¹⁾

1. はじめに

地中レーダは、地表に置いたアンテナから地中に電磁波を放射し、地下で反射して再び地表に帰ってきた電磁波をアンテナで受信して、地下の状況を探査する装置あるいは手法である。通常は、地盤(土質、岩盤)を対象として、地盤構造、埋設物(管)、空洞、遺跡などを非破壊的に調査するのに利用されるが、このほかに、雪氷や淡水を探査対象とする場合もある。淡水湖や河川は、電磁波が伝搬する媒質(淡水)が一様であるため、底面から明瞭な反射が得られることが知られている。

本稿では、口絵写真もまじえ、地中レーダにより河川の水深、河床の形状、洗掘状況を探査した事例を紹介する。

2. 河床の形状・洗掘状況の測定

河床の形状や洗掘状況を調査しモニタリングすることは、洪水時に備えた防災対策を講じる上で、また橋脚等の維持管理の面から必要なことである。

通常、河川の水深測定は測量竿、測量綱あるいは音響測深器により実施されている。しかしながら、これらの手法は河川の水深を測定するだけであり、河床下の地盤状況を探査することはできない(音響測深器では、ごく浅部に限られる)。

平常時に、洗掘状況、堆砂状況、基盤岩分布形状などの河床下部の地盤構造を把握することができれば、より効果的な防災対策を講じるための検討資料となりうる。地中レーダ装置による探査(以下、レーダ探査と記す)は、河川の水深だけでなく、これらの河床下部の地盤構造を把握できる可能性

があるが、実施例は少ないため適用性把握の実験をおこなった。

3. 淡水の電気的特性

淡水湖や河川などの淡水においては、水面からのレーダ探査が十分可能であるが、実施例は非常に少ない。一般に地盤を対象とした探査において、土質地盤中の地下水の存在が地盤の比抵抗を小さくするため電磁波の減衰が大きくなり、レーダ探査に対し条件を悪くすることが、探査実施者の経験として知られている。このことが、水の中ではレーダ探査は適用が難しいという固定観念を生んでいるのではないかと考えられる。

水という媒質は、淡水の場合、

比抵抗が数10～数100ohm・m

(導電率で数mS/m程度)

比誘電率が81

である。地中レーダ装置で使用している電磁波(数10～数100MHz)では、数m～10m程度の探査深度が得られる。ただし塩水は比抵抗が0.25ohm・m(導電率で4.0S/m)と小さいため、電磁波の減衰が激しく数cm程度の探査深度しか得られない。レーダ探査にとって特徴的な淡水の性質は、

- ・地盤に比べて極めて均質な媒質であり、電磁波が媒質中を伝搬する際の散乱による減衰が小さいこと
- ・水中における電磁波伝搬速度は、空中の1/9(3.3cm/ns)と小さいため、地中レーダで使用している周波数では波長が数cm～数10cmであり、高分解能の探査が可能となること(ns:nanosec, 10⁻⁹秒)

である。

1) 応用地質株式会社つくば技術開発センター 探査工学センター:
〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘43番地

キーワード:レーダ探査, 河床形状, 洗掘状況, 淡水域, 音響測深

4. 実験目的と実験内容

前述のように、淡水はレーダ探査にとって有利な探査条件を有しているが、国内での探査実施例は少なく必ずしも適用性が確認されているわけではない。実験では実際に河川でレーダ探査を実施し、河川の水深および河床下部の地盤構造の探査に対する適用性を確認することを目的とした。

実験地は新潟県を流れる阿賀野川中流域であり、ここで以下の実験を実施した。測定に使用した地中レーダシステムは、アメリカGSSI社のSIRシステムである。

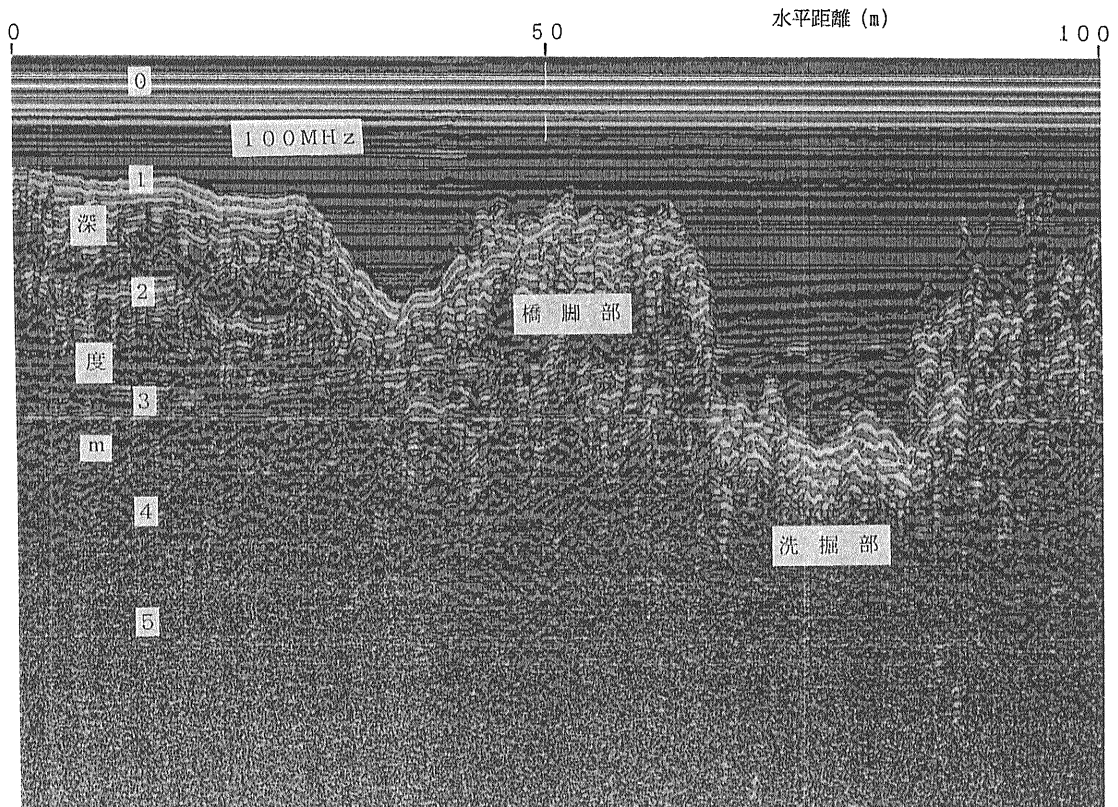
実験1：河床下の地盤構造に対する探査能力を把握するために、ゴムボートの底面にアンテナを設置し、小型船舶の横にゴムボートを固定して水面を移動し測定をおこなった(写真1および口絵1参照)。中心周波数が100MHz、300MHzの2種類のアンテナで測定をおこなったほか、音響測深器に



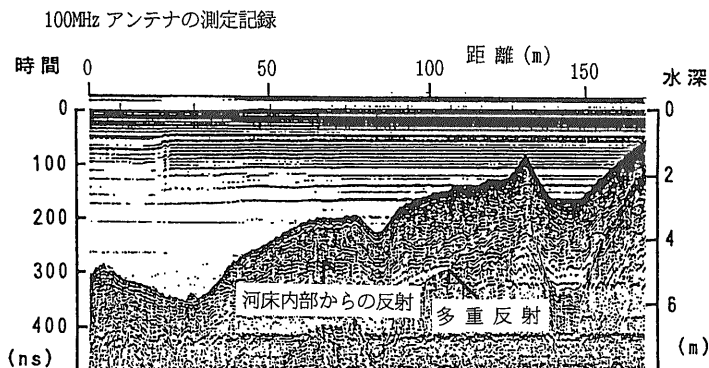
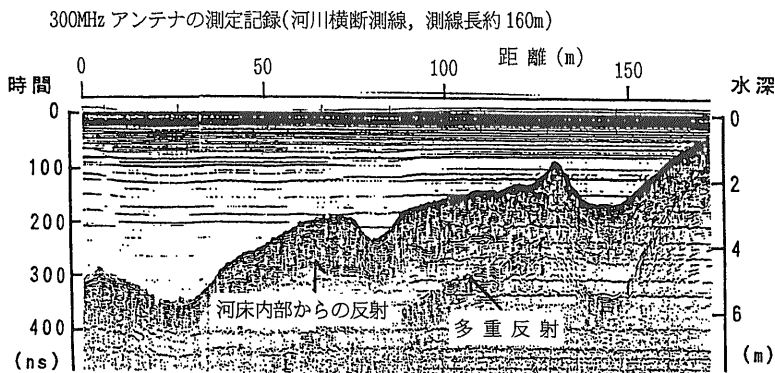
写真1 地中レーダによる水面からの測定状況。

よる測定を併せておこなった。

口絵1(右)上は地中レーダ装置の測定器本体であり、受信信号のフィルタリング、ゲイン調整等をおこなうほか、測定データをデジタルデータとしてハードディスクに収録する。口絵1(右)下のゴムボ-



第1図 レーダによる河床探査測定記録。明瞭な反射は河川底面からの反射で、橋脚部周辺に洗掘により生じた窪み状の形状が捕えられている。



第2図
アンテナ周波数を変えた
測定記録.

ト内に見えるのは、中心周波数300MHzのアンテナである。

実験2：例えば洪水時などにおいては、水面上にボートを浮かべて測定をおこなうことは困難になる。このような場合には、アンテナを水面から離すことが考えられるが、この時の探査能力を確認するために実際にアンテナを水面から離して測定を試みた。

5. 実験結果

5.1 レーダによる河床探査例

第1図は、100MHzアンテナをゴムボートの底面に設置して、河川横断方向に測定をおこなった測定記録である。

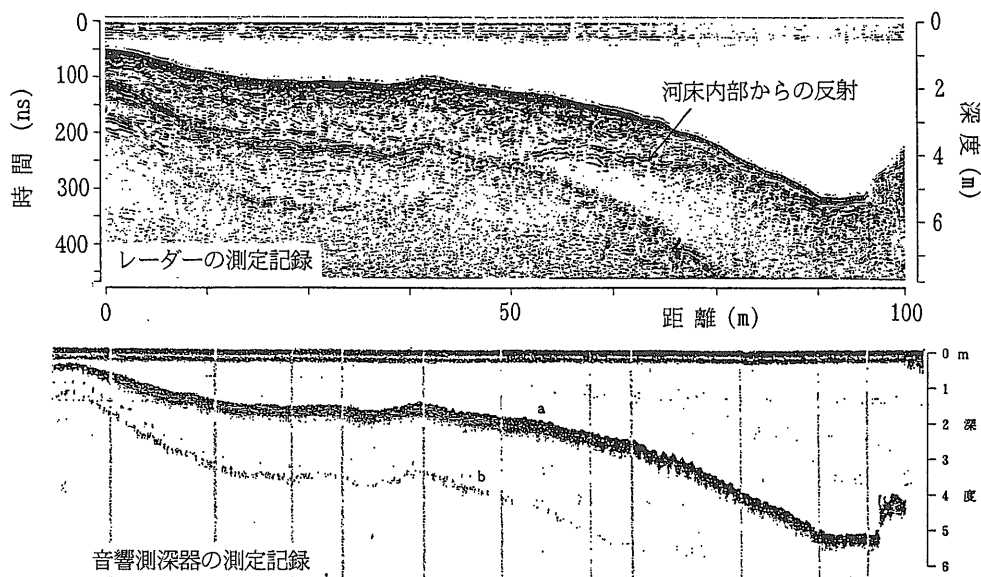
横軸が水平距離であり、全体で約100mである。縦軸は電磁波が放射されてから受信される間の往復反射時間であり、フルスケール400nsである。往復反射時間は、媒質中の電磁波伝搬速度から深度に換算することができるので、測定記録は測線下の断面に相当するものと考えて良い。測定記録に

は、水の電磁波伝搬速度(3.3cm/ns)を用いて深度スケールを付したが、これは水深に相当する。河床以深では電磁波伝搬速度が水よりも大きいいため、実際の深度より見掛け上小さい深度が表示されていることになる。

水は地盤等と比べると極めて均一な媒質であるため、水中における反射はほとんど認められない。明瞭な反射は、河川底面からの反射であり、深度1m～3mまで変化していることが判る。また、橋脚部周辺では洗掘により生じたものと推定される窪み状の河床形状が捕えられている。

5.2 アンテナ周波数を変えた測定

300MHzアンテナと100MHzアンテナにより得られた測定記録を、第2図に示す。いずれのアンテナにおいても、河川底面(最大深度約6m)およびそれ以深からの明瞭な反射が得られている。また、河川底面からの反射波のちょうど2倍の反射時間に、水面と河川底面との間で生じた多重反射が現われている。最初の反射と多重反射の間に見られる反射は、河床下部の地盤中において生じた反



第3図 レーダと音響測深器の測定記録の比較. レーダにより水深測定あるいは河川底部の形状調査において音響測深器と同等の結果が得られ, さらに河床下部の地盤中の構造が捕えられている.

射と考えられ, 深度は約2mである. このことから, 地中レーダにより河床下部の極浅部の地盤構造を把握できることがわかった.

アンテナの中心周波数による測定記録の違いを見ると, 周波数の違い, すなわち波長の違いを反映して, 高周波数のアンテナ(300MHz)ほど高分解能の記録となっている. また, 低周波数ほど電磁波が媒質を伝搬する際の減衰が小さいため, 100MHzアンテナのほうがより深部まで明瞭な反射が得られている.

河川におけるレーダ探査に限らないが, 探査対象である河川底面や河床下部からの反射が捕えられることが探査の必要条件であるから, 明瞭な反射が得られる周波数のアンテナを選択することが必要となる.

5.3 レーダと音響測深の比較

第3図は, レーダおよび音響測深器による同一測線上(河川横断測線)での測定記録である. いずれの測定記録も, 河川底部からの反射が明瞭に捕えられている.

測定地点は河川の中流域に位置し, 河床は主として砂質土が堆積している. 音響測深器は浅海用の高周波数(200KHz)型であり, 砂質土では河床

内部に音波が浸透しにくいいため, 河床下部からの反射は見られない. これに対して, レーダでは河川底部からの反射の下にも河床下部の地盤中からの反射, すなわち堆積層中の境界面等によるものと考えられる反射が認められる.

したがって, 地中レーダが河川の水深測定および河川底部の形状の調査に対して, 従来から使用されている音響測深器と同等の結果が得られること, さらに音響測深器では捕えにくい河床下部の地盤中の構造を探索することも可能であることが判った. ただし, レーダの適用は電磁波の減衰が小さい, 河川上流・中流域などの淡水域に限ることに注意する必要がある.

5.4 アンテナを水面から離れた場合の記録例

例えば洪水時などには, 緊急対策を講じるために, 河床形状およびその経時変化を迅速に把握することが強く求められる. このような場合, アンテナを水面から離して測定をおこなうことができれば, 迅速で安全な探査が可能となる. そこで, 実際にアンテナを水面から離して測定をおこない, 探査能力の確認をおこなった.

河川横断方向の測線において, 中心周波数100MHzのアンテナを用いて, アンテナの水面から

の高さを変化させた場合の測定記録を、口絵2に示した。図の左から高さ0.3m, 1.0m, 1.3mと段階的に変化させた。

高さ0.3mでは、水深3.8mの河床からの明瞭な反射が得られている。高さ1.0mでも河床からの反射は得られているが、反射強度が弱くなっているのが判る。高さ1.3mでは、水深が1.5m以浅と小さくなったためか、再び河床からの反射が明瞭に捕えられている。また、アンテナの高さ1.0mから1.3mにかけて河床からの反射が不明瞭の部分があるが、この間は他の船舶の航行により発生した波により測定中の小型船舶が揺れて、アンテナ開口面の方向が真下方向に一定でなくなったこと、および水面に小波が立ったため、水面で電磁波がランダムに散乱したためと考えられる。

この測定結果から、100MHzアンテナでは水面から高さ1m程度離れた場合でも、アンテナ開口面が真下を向き水面が静かな状態であれば、4m程度の水深測定すなわち河床形状の探査は十分に可能であることがわかった。しかしながら洪水時のように水流が激しい場合には、記録の質が急激に悪くなることが推定され、現状のままでは適用が難しく、今後の課題と考える。

6. おわりに

地中レーダの河床形状・洗掘状況、河床下部の地盤構造探査に対する適用性を把握するために、河川中流域において実験をおこなった。その結果、最大水深約6mの河床からの反射が明瞭に捕えられ、さらに河床の堆積層中の境界面により生じた反射が得られた。このことから、地中レーダにより河床形状・洗掘状況はもちろん、河床下部の極浅部（深度約2m）の地盤構造も探査することが可能であることが判った。

また、洪水時などに河床形状およびその経時変化を迅速に把握することを想定して、アンテナを水

面から離れた測定をおこなった。アンテナを水面から1m程度離れた場合でも、アンテナ開口面が真下を向き水面が静かな状態であれば、水深4m程度の河床形状の探査が可能であることがわかった。しかしながら洪水時のように水流が激しい場合には、記録の質が悪くなることを示唆する測定結果であり、このような状況下でも探査可能とすることが今後の課題である。

これまで、地中レーダを河川河床部の探査に用いた事例は非常に少ないが、本稿に示したように河川中流域など淡水域にあっては、河床形状・洗掘状況だけでなく河床下部の地盤構造の探査にも適用可能である。今後、洪水時に備えた防災対策を講じる上で、また橋脚等の維持管理の上で有効な検討資料を提供する手法として利用されるものとする。

謝辞：本実験を実施するにあたり、建設省北陸地方建設局阿賀野川工事事務所、新潟大学工学部岡本芳美教授のご指導、ご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 物理探査学会編(1999)：物理探査ハンドブック、物理探査学会、pp. 1336.
- Cook, J. C. (1960)：Proposed monocycle-pulse, VHF radar for airborne ice and snow measurement, AIEE Comm. And Electronics, No.51, 588-594.
- 前晋爾・浦塚清峰(1991)：南極の氷を電波で調べる、電子情報通信学会誌、Vol.74, No.9, 900-903.
- 岡本芳美・竹本康雄・安藤 廉(1992)：積雪深と河川水深のレーダによる空中からの測定、第18回リモートセンシングシンポジウム資料、計測自動制御学会、135-138.
- 田村晃一・利岡徹馬・陣内龍太郎(1993)：河川洗掘調査への地下レーダ法の適用例、全地連技術フォーラム'93講演集、49-52.
- Ulriksen, P. (1982)：Application of impulse radar to civil engineering, Geophysical Survey Systems, Inc., pp.175.

TOSHIOKA Tetsuma (1999)：Application of GPR to river-bottom survey.