

研 究

佐賀市多布施反射炉跡の地中レーダ探査

半田 駿・中田 文雄

1 はじめに

幕末期大砲鑄造を目的として、佐賀藩により日本で最初の反射炉が2基建築された（例えば；長野、2000）。最初の反射炉である築地反射炉は、嘉永3年（1850年）6月に現在の日進小学校敷地内（佐賀市長瀬町、図1）に建設され、その3年後（1853年）には、多布施川沿いに多布施反射炉（佐賀市伊勢町）が完成した。残念ながら2カ所とも現存しないが、多布施反射炉は大正期に発掘調査され、それに関する図面が残っている（肥前史談会、1928）。ただ、多布施川を起点とするため、河川の修復等のため起点が変更されている可能性があり（図2、佐賀市教育委員会、私信）、建築物の規模は問題ないとしても、絶対的な位置関係に若干の疑義がある。しかし、現状は建築物等のため、確認のための新たな発掘調査は容易ではない。

本研究では、上記の理由から発掘調査困難な反射炉等の位置を、非破壊調査である物理探査によって明らかにすることにある。ここでは、地中レーダ法を用いた結果について報告する。



図1 探査地点。同図には主要道路と共に、多布施川、天祐寺川、及び佐賀城の壕も示した。

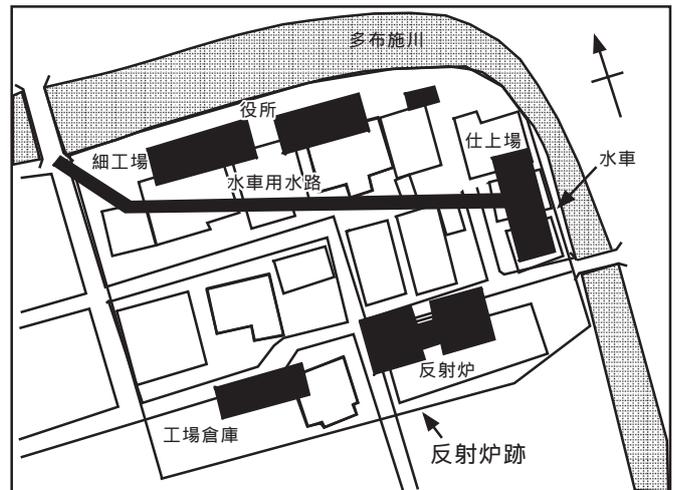


図2 多布施反射炉施設想定図（佐賀市教育委員会、私信）。

2 地中レーダ法

地中レーダ法では、送信アンテナから地中に向かって高周波電波を放射し、地層境界面や埋設物等の電気的物性値の異なる境界面で発生する反射波を、通常送信アンテナと一対となっている受信アンテナで受けることにより、地中の状態の把握が可能である。本探査で使用した装置は、アンテナ部、制御部、収録部、及び表示部からなる。使用した電磁波の中心周波数は、深度2～3m程度を対象とするため350MHzとした（佐賀大学農学部地圏環境学教室、2005）。

地中に放射された電磁波は深部になるほど強度が減衰するが、その割合は地下の電気的物性である誘電率、

電気伝導度に依存する。強度が $1/e$ (約0.37)となる深度をスキンドープと呼ぶが、このパラメータは上記の誘電率、電気伝導度だけではなく周波数にも依存し、高電気伝導度の媒質、高周波の電波ほど小さくなる。地中レーダ法では高周波ほど分解能は高くなるが、例えば水分含有量の大きな堆積層等、地下の電気伝導度が大きい場所では周波数を高くすると電波は急速に減衰するため、深部での探査は困難となる。このような弱点もあるが、地中レーダは他の方法に比べ分解能が高く、地下の可視化に優れているため考古学的調査として優れた方法である (例えば、半田ほか、1992; 半田・迫田、1992)。

3 多布施反射炉跡地での調査の概要

調査は2005年1月18日に実施した。図2に、佐賀市教育委員会によって作成された多布施反射炉施設想定図を示す。この図で分かるように、反射炉施設跡地には多くの家屋があるため調査は限定されたものにならざるを得ない。しかし中心施設である反射炉は、想定図が依拠した大正期の発掘調査から (肥前史談会、1928)、現在ではプレハブ1階の駐車場下にあると想定され、後述のような制限はあるもののレーダ探査は可能である。なお、反射炉跡は駐車場周囲の道路にも及ぶと考えられるが、図3の測線図に示されるように、ここには下水道管及びマンホールが設置されている。これらは電波を強く反射するため、探査にとって大きな障害となることが予想される。

施設には反射炉以外にも鋳造された大砲の砲身をくり抜くための水車及び水路があり、この確認のために道路及び家屋間の隙間を利用した探査も実施した (図3の測線7~11)。

地中レーダ探査結果の分析には、反射波の振幅の大きさをカラー化したレーダ画像が用いられる (図4、6、7)。このような図では、横軸は水平距離、鉛直軸は反射波の伝搬時間を用いるのが一般的である。しかし図には深度 (d) も示した。この値は、電波の伝搬速度 (V)、同往復伝搬時間 (t) から、 $d=Vt/2$ によって求まる。ただし、電波の伝搬速度は伝わる媒質 (主として比誘電率) によって異なる。比誘電率の測定は必ずしも容易でないため、図中の深度は比誘電率を10と仮定した値である。従って、正確には往復伝搬時間で議論すべきであるが、分かりやすさを考慮して、以後はこの推定した概略深度で議論する。

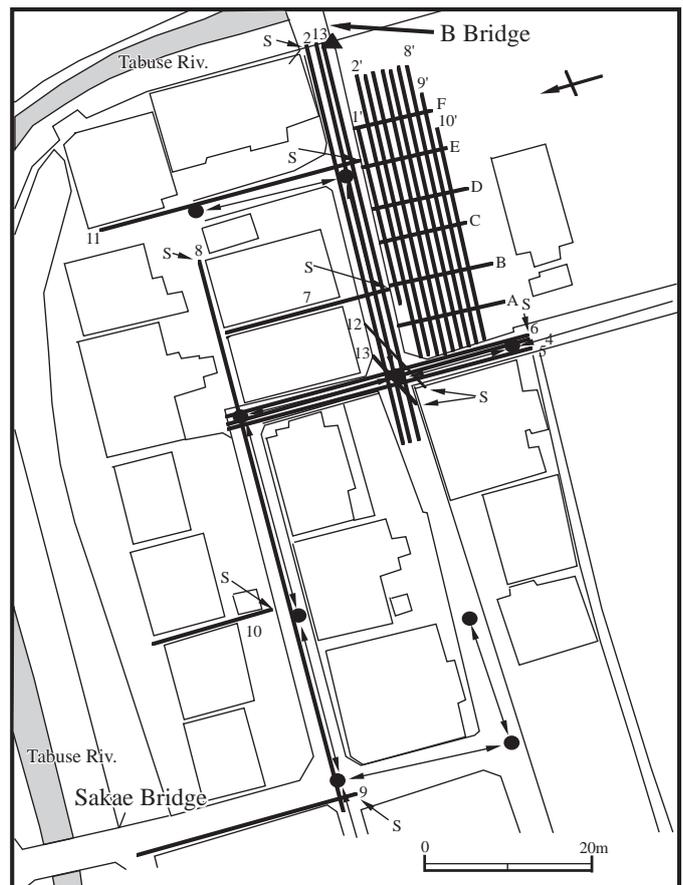


図3 地中レーダ探査測線図。数字は測線番号で、測線の始点をSで示した。図中の黒丸は下水道用マンホール、矢印は下水道管の配置を示す (佐賀市下水道部)。▲は1'~10'測線の起点位置。

4 探査結果

4-1 反射炉跡

図4は駐車場測線でのレーダ画像の一部である。測線の詳しい位置は図5に示した。図5では、水平目盛の起点はB橋の西端(図3の▲)であり、縦目盛の起点は駐車場北端のブロックである。測線2'から10'(Line-2'~10')の測線間隔は1mである。ここはプレハブ事務所の1階部分であるため、建物を支える柱(図5の四角部分)及びH型鋼による基礎構(同図の太線)があり、これらはレーダ波を強く反射する。例えば測線2'では、8、18、28m付近の表面から深度約3mまで楔状に延びる映像がこれに相当し、他の基礎構部分でも深度約1m付近に強い反射として現れる(図4)。そのため、測線1'及び1'~10'に直交する測線A~Fは、測線全体がこの構造と重ならないよう設定した。

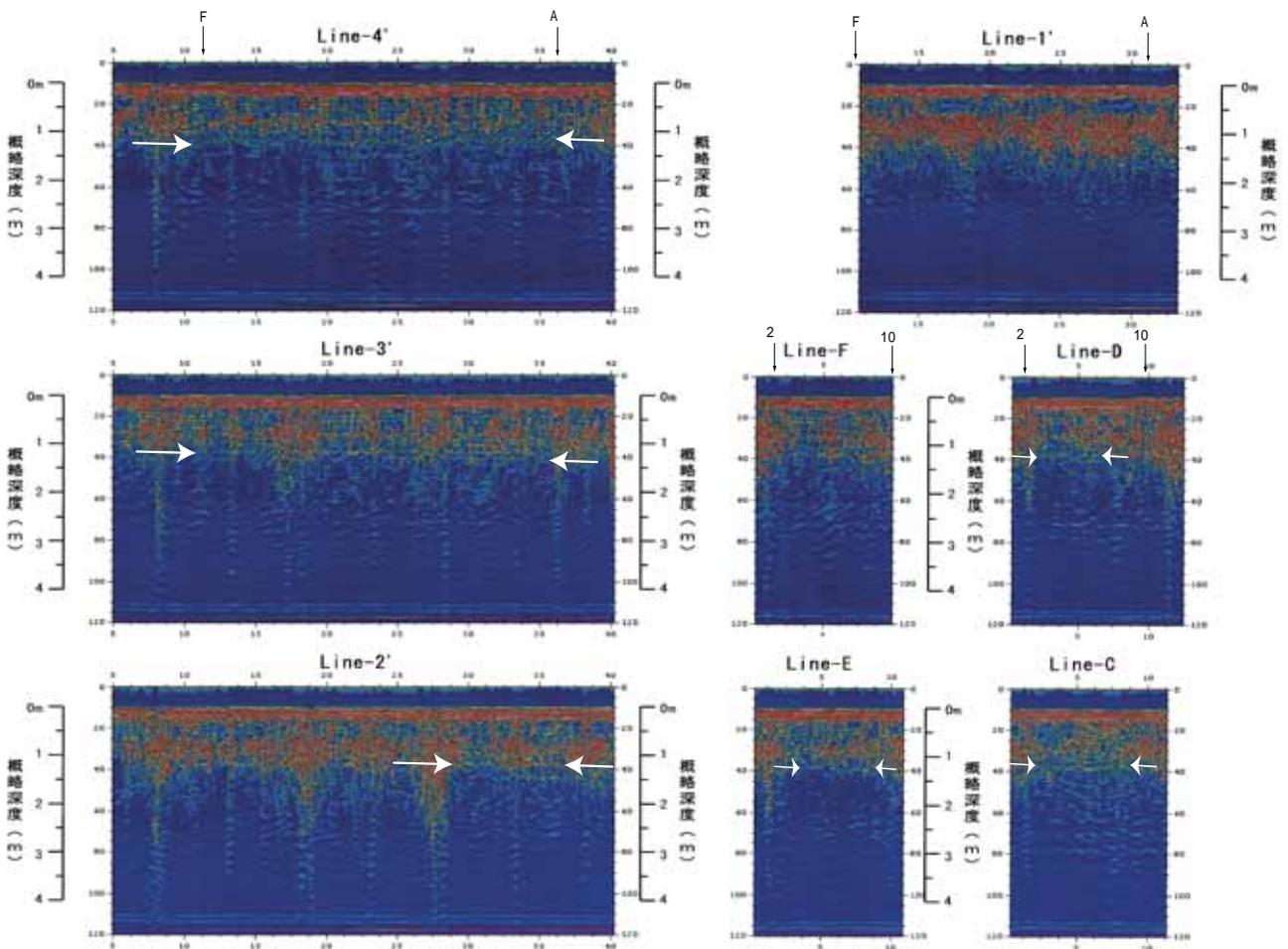


図4 駐車場内での地中レーダ解析断面図(測線1'~4', C~F)。図上部の小数字は、図3の三角(B橋)からの水平距離(m)、縦軸の小数字は往復伝搬時間(ns)。縦軸には概略深度(m)も示した。反射炉跡の表土からと思える反射波を矢印で示した。

これらの「ノイズ」が少ないと思われる領域を見ると、例えば、4'測線では11~36m間で深度1.2m付近に、矢印で示したような極めて弱いがほぼ水平に連続する反射波(面)が見られる。このような反射面は、図4では測線1'及びFを除く全ての測線に現れている。これらは構造に関係するものと思われるが、強度が弱いことから敷石やレンガなどではないことは明らかである。なお、画像上部の強い反射は地表面によるものである。

このような反応が検出された測線を太い破線で示すと、図5の薄いハッチで示すように限られた領域にまとまっている。この領域の長さとは幅は24m及び6mとなる。大正期の反射炉発掘図面を基にした施設想定図（図2）と比較すると、長さは反射炉の図面（約23m）に近い値となるが、幅はかなり小さい。反射炉跡地の発掘記録（肥前史談会、1928）では、反射炉の基礎に松材が用いられ、それらは発掘当時地表より4尺2寸（約1.27m）の深さにあったことが示されている。これらの松材は、東西には9尺毎に、これらと直角の南北には3尺毎に置かれていた。また、この上に3段積みの赤石が、さらにその上には煉瓦が積まれていたが、これらの煉瓦と石は全て撤去されたことが老人の記述として記載されている。レーダ探査での反射層の出現深度が1.2~1.4mであり、当時の表層を示す松材の深さとほぼ同じであることから、この弱い反射層は熱等の固結、あるいは突き固められた反射炉下の表土からの反射波である可能性が高い。

図2の推定される反射炉跡は駐車場を越えて北側の道路まで広がっているのに対し、最北端の測線1'にはこれらの反応は認められない。駐車場北側の道路沿いでの地中レーダ解析断面図を、図6左の3図（Line-1~3）に示す。断面図上部の数値は、図5と同様にB橋の西端からの距離である。図は左が起点となるため、北

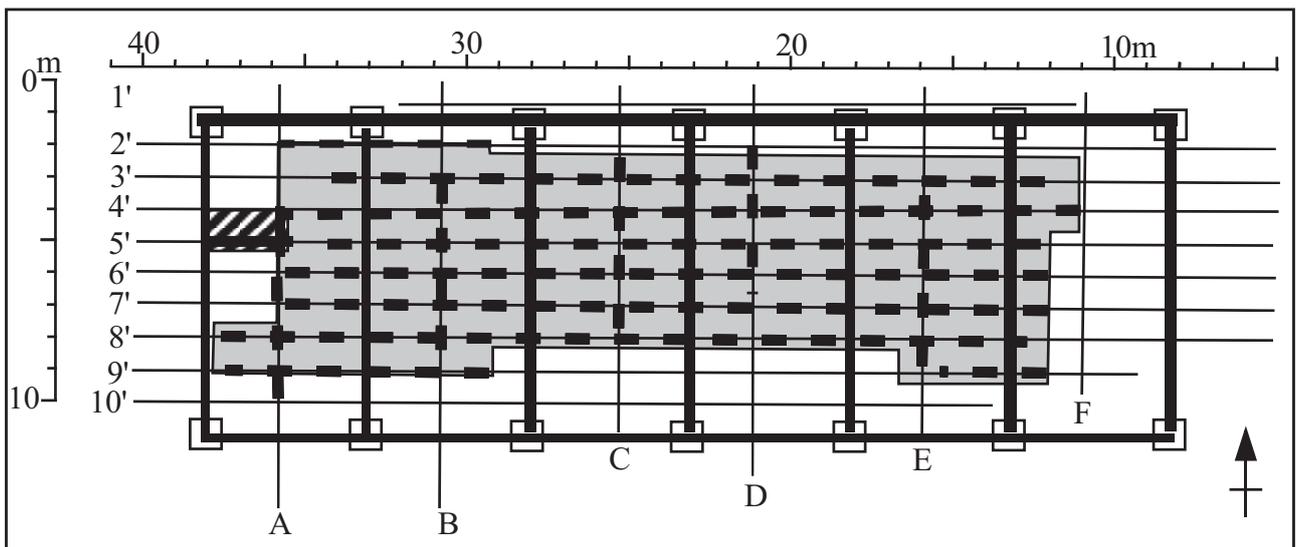


図5 反射炉跡の地中レーダ探査結果。番号の付いた細線は測線、太い破線は反射炉跡の表土からの反射波が認められた地点、斜線部は強い反射波の検出された箇所を示す。四角は鉄柱の位置、太線は基礎構造物の位置。薄いハッチ部は反射炉の基礎部と考えられる範囲を示す。

側から見た道路下の断面図となる（図4の測線1'~10'も同様）。測線1の中央付近には下水道管、及びその工事の影響と考えられる強い反応が見られ、その両端に下水道用マンホール（M）が現れる。また前日の雨のため道路には水たまりが1カ所あったが、水は高い比誘電率を持つためこの影響が測線1と3に強く現れている。

施設想定図では、反射炉はこの道路の北端付近まで続いている。ところが、下水道施設の影響が比較的小さいと思える測線2でも駐車場下のような反射面はみられない。道路は多布施川を越えるため、東側で50cm高くなっている。したがって、駐車場と道路間の段差は東側で0、西側で50cmである。このことから、駐車場で見られた弱い反射面の深度は、そのまま延長すると道路では1.4m~0.9mとなる。下水道管の設置深度は約1

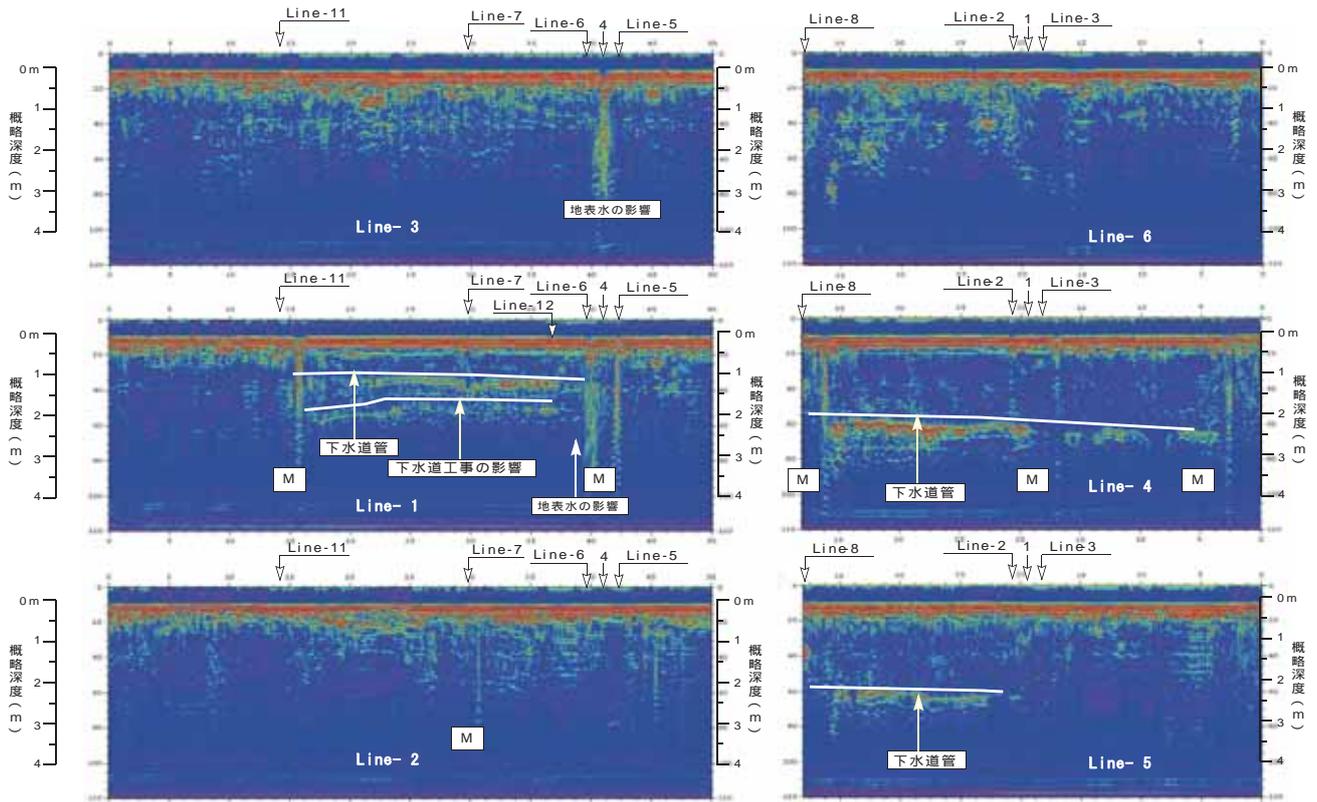


図6 駐車場北側(測線1～3)、及び西側道路(測線4～6)での地中レーダ解析断面図。図上部の数字は水平距離(m)、縦軸の小数字は往復伝搬時間(ns)。縦軸には概略深度(m)も示した。Mはマンホール。解析断面図上部に、交差する測線番号を示した。

mであり、おそらく道路では下水道工事、また駐車場北部ではプレハブ建設工事により、これらの面は破壊されてしまった可能性が高い。

図6の右図は、駐車場西の道路沿いの測線4～6(起点は測線の南端、図3のSで示す)の解析断面図である。断面図の右側(駐車場付近)では、測線4のみが下水道管の影響を受けている。この測線も施設想定図では反射炉の西端が存在すると考えられている。しかし、道路の両端の測線5、6には下水道管の影響はないにもかかわらず、反射炉と思われる反応は存在しない。

反射炉の西側も北端と同様、下水道、駐車場工事によって破壊されていることもあり得る。しかし東西方向については、弱い反射面の端は駐車場内の測線内にあり比較的明瞭であること、また全体の長さも施設想定図のそれとほぼ一致することから、反射炉跡は西側の道路までは延びていず、図2の施設想定図より東に約10m平行移動した場所にあったと考えるのが合理的である。はじめに述べたように、その後の多布施川の工事等により起点が変わった可能性もあり、この東への平行移動は十分考えられる結果である。

なお、反射炉跡と考えられる領域の西端付近には極めて明瞭な反射を示す箇所があり(図5の斜線部分、大きさは2m×1m)、人工構築物と推定される。しかし、反射波形だけでは遺構であるか、駐車場あるいは現在の事務所の建築工事の影響であるかの判別は困難である。

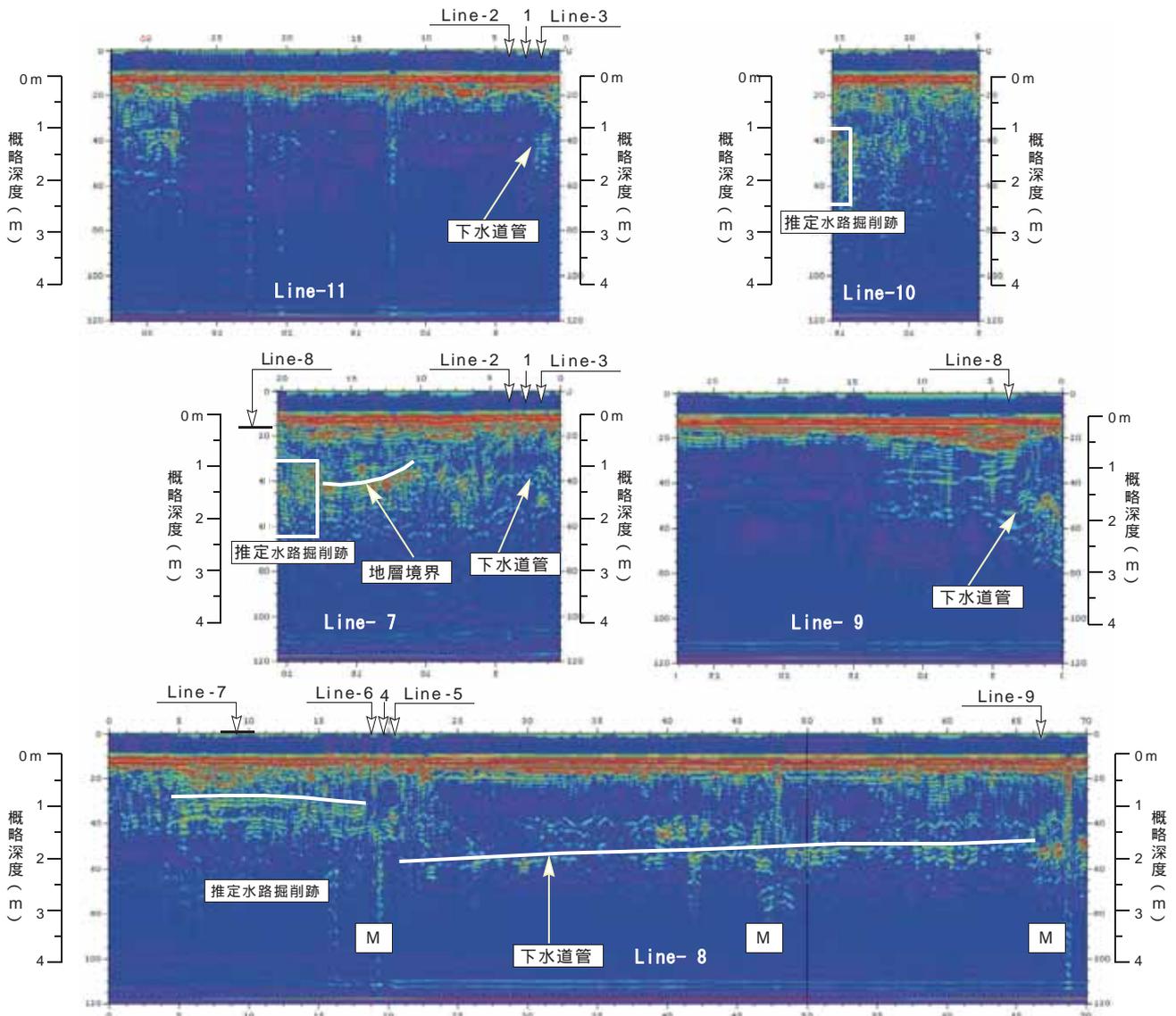


図7 水路跡探査の地中レーダ解析断面図（測線7～11）。図上部の数字は水平距離（m）、縦軸の小数字は往復伝搬時間（ns）。縦軸には概略深度（m）も示した。Mはマンホール。解析断面図上部に、交差する測線番号を示した。

4-2 水路跡

水路跡検出のために実施した測線7～11でのレーダ解析断面図を図7に示す。図のように測線7、8及び10に、人工構築物と推測される強い反射波が認められる。例えば、測線7は家屋間を通り上記駐車場の北側道路に達する測線であるが、測線の終点付近の深度約1～2.5mに反射の強い領域がある。駐車場下の旧表土と考えられる面の深度が1.2～1.4mであるので、駐車場の段差も考慮すると、この測線での遺跡面は深度約0.9～1mである。したがって、これが旧表土より約1.5m掘り下げられた構造であることが分かる。測線8では、この領域が水平に15m程続いている。しかし、この顕著な反射域は測線9および11にはない。

図8に、この構造が現れる領域を測線上に太線で示した。図のように、これらは直線上に位置すること、また旧表土より掘り下げた構造であることから、仕上場に設置された水車に水を引いた水路（図2）跡である可能性が高い。この幅は図の太い点線で示したように約4mである。水路の護岸が石で出来ていると考えられ

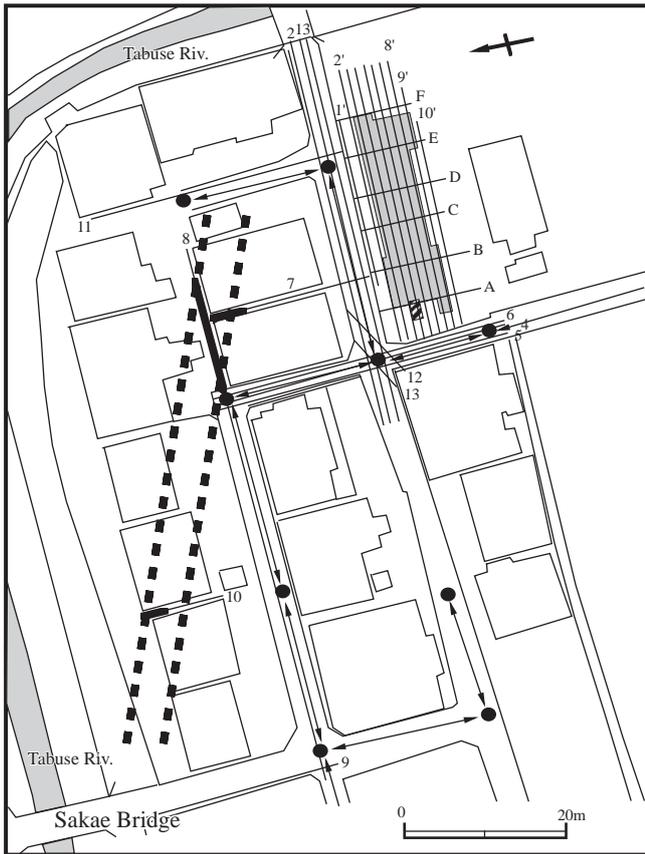


図8 水路推定図（破線）。細線は測線で、太線部は水路跡と考える反応が検出された位置。図中の黒丸は下水道用マンホール、矢印は下水道管。図には、薄いハッチで反射炉跡の推定位置も示した。

ら、中心施設である反射炉基礎のほとんどが大正時代の発掘調査によって撤去されていることが分かった。しかし、高温等で固結した、あるいは突き固められたと考えられる表土層が検出できた。

3、この表土層は、北部は工事等で破壊されていると思われるが、東面にはほぼ反射炉と同じ広がりを持っている。

4、また、大正時代の発掘図面を基にした反射炉跡の推定位置とは、南北はほぼ同じであるが、東には約10mずれていると考えられる。

5、水車のための水路跡が、推定位置とほぼ同じ場所で検出された。

謝 辞

本研究は、佐賀市の委託による研究の成果である。佐賀市産業部 観光・文化課、及び佐賀市教育委員会の関係者各位にお礼を申し上げる。また、駐車場での探査の便宜を図って頂いた株式会社ミゾタにも感謝の意を表す。

るので、上記4mはこれら全てを含む値と考えるべきである。また、水路建設に伴う掘削工事の影響も検出しているかもしれない。

なお、測線7や9で検出されている円弧状の反射波は、下水道管などの管状構造物を横切った時に現われる典型的なパターンである。

5 おわりに

幕末期に佐賀藩によって建設された多布施反射炉跡で、地中レーダを用いた探査を実施した。この遺跡には現在、住宅、会社のオフィスがあり、また道路にはマンホール等の上・下水道施設が設置されており、調査環境は決して良いとはいえないが、遺跡内の道路、及びオフィス1階の駐車場で、測線数29、総延長838mの測線を、中心周波数350MHzの装置により探査した。その結果以下のことが明らかになった。

1、当時の表土は、現在の表面から約0.9~1.4mの深さにある。

2、反射炉があったと考えられる駐車場で探査から、

参考文献

- 半田 駿・迫田浩一・新井康平・寺本顕武, 地中レーダ法による吉野ヶ里北墳丘墓の探査, 佐賀大学教養部研究紀要, **24**, 7-16, 1992.
- 半田 駿・迫田浩一, 地球電磁気学的探査法の遺跡調査への応用—Ⅱ. 地中レーダ法と電気探査法による探査と評価—, 佐賀大学教養部研究紀要, **24**, 17-26, 1992.
- 肥前史談会, 反射炉跡に残存する基礎工事説明, 肥前史談, **1**, 34, 1928.
- 長野 暹, 佐賀藩と反射炉, p206, 新日本出版社, 東京, 2000.
- 佐賀大学農学部地圏環境学教室, 多布施反射炉調査報告, p17, 2005.

(半田 駿：佐賀大学農学部教授) (中田 文雄：川崎地質株式会社)