

研 究

築地反射炉跡での電磁気探査

半田 駿・平山明日香・中田文雄・吉田雄司・板井秀典

要約：幕末に佐賀藩が建築した築地反射炉跡の位置を明らかにするために、その存在が有力視されている日新小学校敷地内で、地中レーダ、高周波CSMT、VLF-MTの電磁波探査、電気探査、及び磁気探査を実施した。直線上に連なる強い反射波形が地中レーダ探査から得られ、発掘からその一部は水路跡であることが明らかになった。また、磁気探査から4か所で遺物または遺構の可能性が強いことが分かった。これは、反射炉遺構では磁気探査が有効であることを示唆するものである。

1. はじめに

江戸時代末期（幕末）に佐賀藩は高性能な大砲鑄造を目的として、反射炉の建設を計画した。1850年、日本で最初に建設されたのが築地反射炉であり、3年後、その技術を基にして次の多布施反射炉が、多布施川沿いの伊勢町に造られた（例えば；長野，2000）。多布施反射炉跡の概略位置は、大正時代の発掘により明らかなのに対して、築地反射炉跡は同長瀬町の日新小学校近くにあるといわれているものの、正確な位置はまだ不明である。

我々は多布施反射炉跡地で、大正期の発掘で撤去された反射炉の遺構の一部がまだ残っていないかを確認するため、地中レーダ探査を実施した（半田・中田，2008）。その結果、反射炉跡地であると思われる、やや弱い連続した広がりを持つ反射波が検出された。これは反射炉跡の締め固められた層であると推定される。また探査域内から、後世の反射炉のスケッチとほぼ合致する、直線上に位置する水路跡と思える強い反射波も検出された。

ところで、北部九州の近代化産業遺産群を世界遺産に登録しようという運動が進んでいる。佐賀県でのこの候補になる遺跡は、三重津海軍所、精錬方、及び上述の多布施、築地反射炉である。特に両反射炉は、世界遺産選定の大きな要素の一つである、西洋の技術が在来のそれとどう関わり合って、変貌していったのかを示す格好の対象であり、この点から日本最初の反射炉であるにもかかわらず、位置が不明である築地反射炉跡の所在確認が強く求められている。そこで、ここでも多布施反射炉と同様に地中レーダ探査を計画した。また、同時に高周波CSMT、VLF-MT探査を実施したところ、極端な低比抵抗域が検出された。これらの原因を特定するため、磁気探査及び小規模電気探査も実施した。本論文ではこれらの結果について述べる。

2. 探査地点

図1に探査地点、及び多布施反射炉跡の位置を示す。多布施反射炉が多布施川流域にあるのと同様、ここでも天祐寺川が近くを大きく蛇行して流れており、当時の反射炉建設にとって河川の存在が重要であったことが



図1 調査地点

が容易であることから、図の区域を調査域とした。

推測される。図2に、築地反射炉跡があると考えられている日新小学校の校舎配置図を示す。築地反射炉も多布施反射炉同様、後世の建築物配置図及び見取り図があり、それには中央部に細い水路が描かれている。一般に水路は長いことと、当時の地表から掘り込んでいるため、後世の建物の建造等でも破壊されず一部は残っている可能性が高く、調査で検出される可能性が高い。図2のように学校の北東部に天祐寺川からの水路があり、現在は北に迂回しているが以前は直線上に学校内を通過していたこと、ここが現在駐車場となっており比較的調査

3. 調査結果

3.1 地中レーダ

地中レーダ探査は、2008年12月13日に図2で示す調査域の北部で実施した。レーダ探査測線(図3)は南北測線を基本とし、測線間隔は2mとした。ただし遺跡が存在する可能性が高いと思われる中央部(測線番号

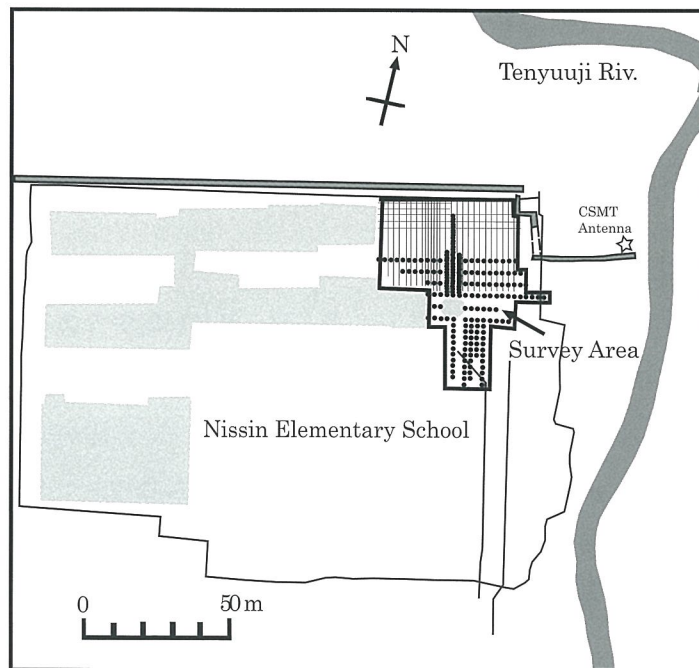


図2 築地反射炉跡があるとされる日新小学校の校舎配置及び調査域、やや濃い部分は水路を示す。細線部は地中レーダ探査域。黒丸は磁気探査測点。星印はCSMT探査用アンテナ設置点

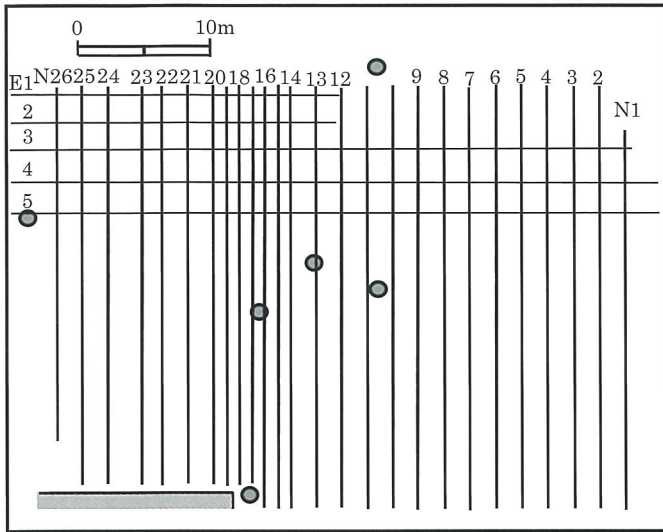


図3 レーダ探査測線及び測線番号. 黒丸は電線, 排水溝等のマンホールの位置. 左下の影の部分は校舎

5は、このレーダ画像での反射波の最下部から反射基盤深度を推定したものである。ただし、強い反射の場合は、多重反射により見かけ上深部からの反射波が現れる。図はこれらを考慮していないので、必ずしも基盤深度を示すのではなく、強い反射物体の存在あるいは基盤深度の目安を示すと考えるべきであるが、この図からも、探査北域が浅く南で深くなることが分かる。また、上記15m付近の強い反射は天祐寺川からの水路の延長上にあり、東西に連続していることから、少なくともその一部は水路と考えられる。

N14~20) では1m 間隔とした。測線長の合計は831mである。使用した機器は光電製作所製 GPR-10C 型機、中心周波数は350MHzであり、その他の実施要領は多布施反射炉跡の探査と同じである (半田・中田, 2008)。

図4にN3、20、24の3測線でのレーダ画像を示す。各画像の縦軸は比誘電率を10とした時の深度であり、横軸は水平距離で、原点はN1~16測線の南端である。図には示さなかった測線も含めて、ほぼ全ての画像中央部である15m付近に強い反射波が見られる。また、ここを境として北では反射面最深部は約1mであるのに対し、南側では約2m程度と深くなる。図

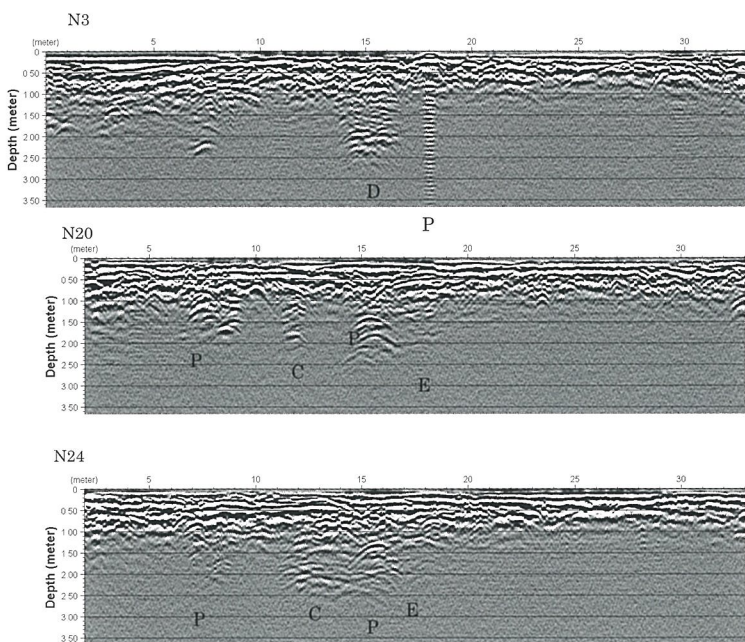


図4 3測線でのレーダ反射図. 縦軸は深度, 横軸の目盛りは南端から測った距離 (m). C, D, Eは遺跡, 遺構の可能性のある反応. Pはマンホール, 埋設管

3.2 MT探査

地中レーダ探査と同時に、VLF-MT探査 (テラテクニカ製、使用周波数は、えびの局からの22.2kHz) 及び高周波CSMT探査 (板井ほか, 2005) を実施した。図6にVLF-MT測定点を四角で、高周波CSMT測線を太線で示す。VLF-MT探査での電場成分の電極間隔と方向は、測定点を中心として東西10mである。高周波CSMTの送信点は、図2の星印で示した。測点間隔、電極間隔はどちらも2mで、電極は南北方向 (送信方向に直角) とした。使用周波数は、2k~150kHzである。なお、VLF-MT測定点の後の括弧内の数値は、得られた見

掛比抵抗値 (Ωm) である。

図7は高周波CSMT探査のCS1測線での見掛比抵抗疑似断面である。図では、見掛比抵抗値(対数值で表示)は、寒色系で低く、赤色になるほど高くなる疑似カラーで示した。縦軸は周波数であり、横軸は水平距離である。CSMT探査では周波数が低くなるほど電波は深部まで到達するため、この図は縦軸に周波数を用いているが、上記の理由から擬似的に深度を示していることになる。レーダ探査結果から水路と推定される場所付近

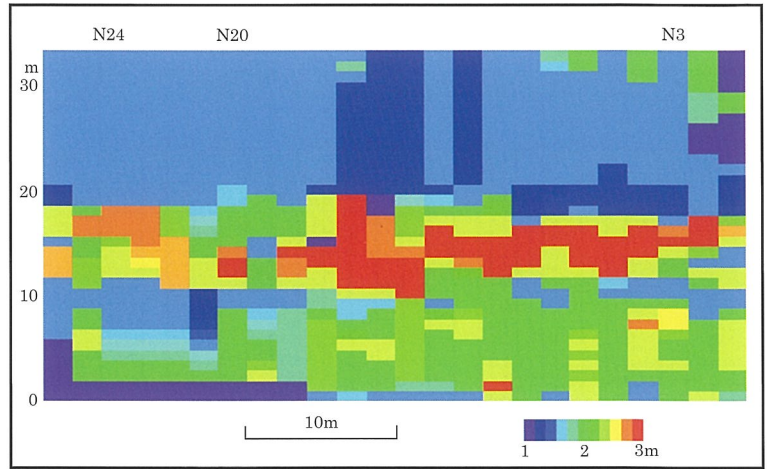


図5 レーダ反射波の最下部から推定した反射基盤深度分布. ただし、反射波の最下部をトレースしたため、必ずしも基盤深度そのものではない

では、やや高比抵抗値となっているが、特に顕著なのは、測線の南側に青色で示される見掛比抵抗の低い領域 ($10\Omega m$ 以下、図では対数なので1以下) が存在することである。この低比抵抗域は、図6の濃い太線で示すように、CS2及びCS4測線でも見られる。VLF-MT観測でも、V11測点で $1.3\Omega m$ と低い値が得られることから、その存在は確かであると思える。この低比抵抗は、探査域が反射炉跡地である可能性を考えると、金属類を含む層の存在を示唆すると考えるのが自然である。

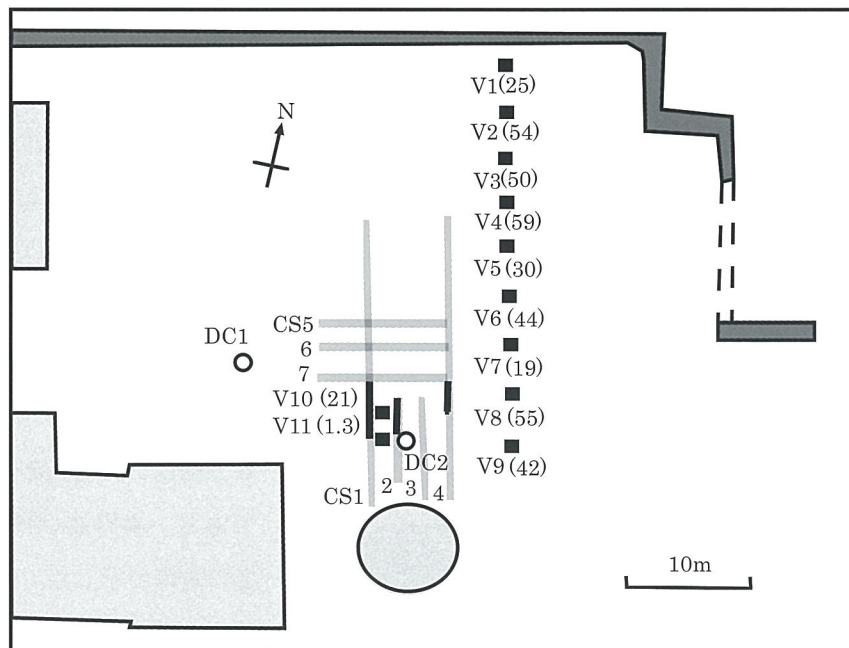


図6 高周波CSMT測線(太線), VLF-MT測点(四角), 及び小規模電気探査(○)測点. やや黒い影の部分は水路. 濃い太線は、低い見掛比抵抗が観測された区間. VLF-MT測点名の後の括弧内は観測された見掛比抵抗値を示す

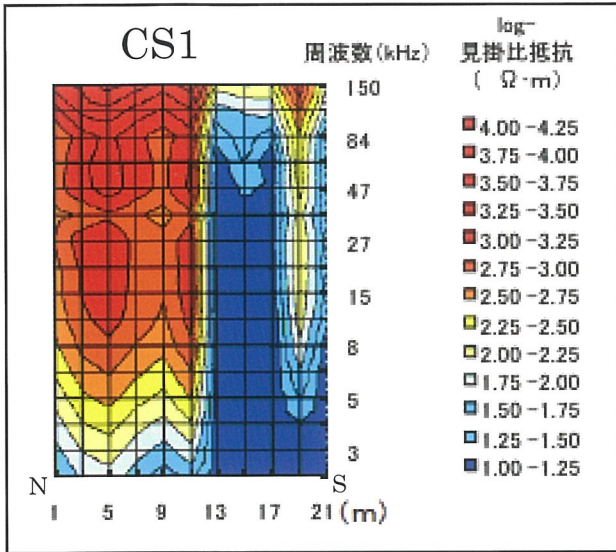


図7 高周波CSMT 探査における、CS1測線での見掛比抵抗の疑似断面図。青色ほど低比抵抗(対数で表示)となる

表1 小規模電気探査結果. Resistivityの単位はΩ m

Layer's No.	DC1		DC2	
	Resistivity	thickness(m)	Resistivity	thickness(m)
1	180	0.6	110	0.4
2	30		50	1.8
3			10	

3.3 小規模電気探査

高周波CSMT法では、送信電波の最大周波数は150kHzである。予想される幕末時の地表面は1m程度の深度であると考えられるので、この周波数帯域で浅部の詳細な比抵抗構造を得ることは困難である。そこで、MT探査で検出された低比抵抗域と、それ以外での比抵抗構造の違いを明らかにするために、2009年7月に小規模電気探査(電極間隔の最大値は5m、電極方向は東西)を低比抵抗域内のDC2、及びそれから外れているDC1の2カ所(図6の○)で実施した。

表1に電気探査データから得られた比抵抗モデルを示す。両地点ともに表層の深度0.4~0.6mで比抵抗がやや高く、その下に30~50Ω mの比抵抗層が存在する。両者で大きく異なるのは、DC2地点では1.7mより深部に10Ω mの低比抵抗層が存在するのに対し、DC1地点ではこの層がないことである。この層はおそらく帯水層であり、高周波CSMT、VLF-MT観測での見掛比抵抗低下は金属類ではなく、この帯水層によって生じた可能性が高い。

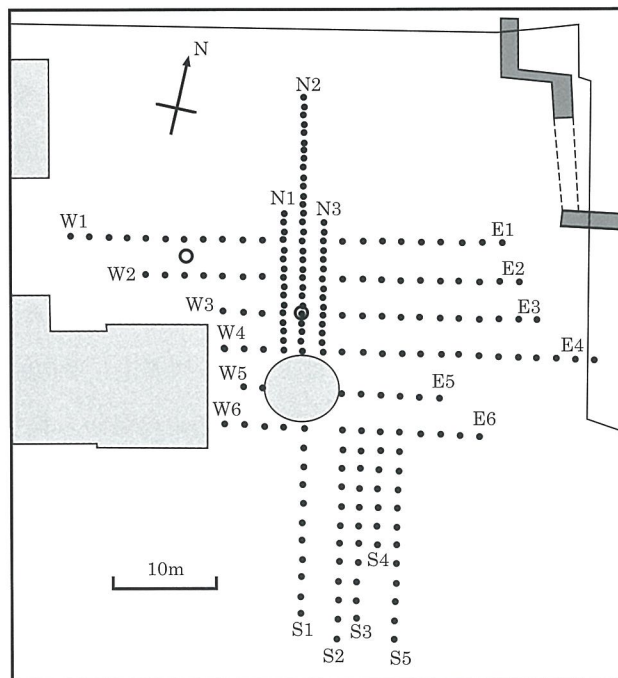


図8 磁気探査測点分布。やや黒い影の部分は水路。丸印は小規模電気探査測点

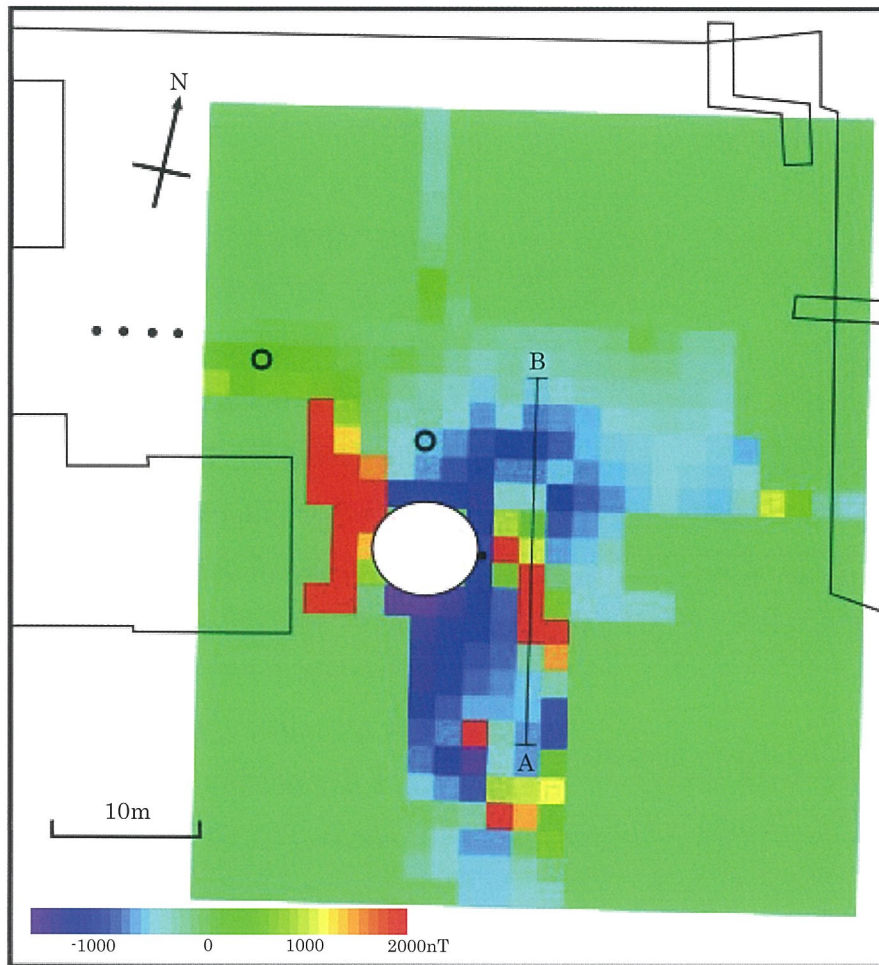


図9 磁気異常図. ABは磁気異常モデル計算に用いた測線

3.4 磁気探査

MT探査では一見金属の存在が示唆される結果が得られた。上記のように、電気探査の結果も考慮すると、金属を含む層ではないようであるが、これら低比抵抗値が観測された小学校玄関前の円形花壇を中心とした区域で、プロトン磁力計（国際電子製HPM-555、感度0.1nT）による磁気探査を2009年6月に実施した。図8に

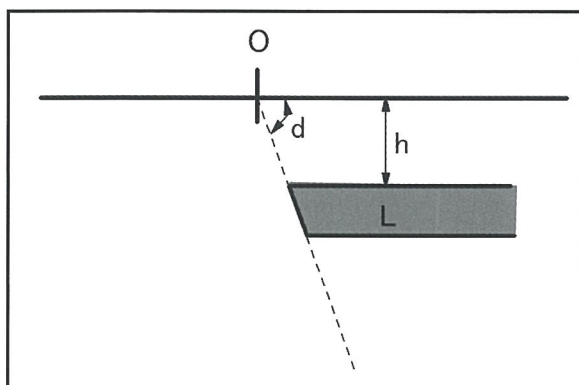


図10 帯磁層モデル. Oはx軸の原点, d は層端の傾斜角, h は帯磁層の上端から観測点までの高さ, L は帯磁層の厚さ

測点分布を示す。測線N1~3では測点間隔は1m、他は2mである。測定はセンサー高2.45mで行い、基本的には1点で5回測定し平均値を得た。

図9は測定結果から得られた磁気異常図である。暖色系が正の磁気異常を、寒色系が負の磁気異常を示している。ただし、標準磁気は全測定値の平均値47868nTとした。また、測線間隔が4mの場合、両隣のデータから補間して連続となるようにした。図で示すように、ここでの全磁力標準値の1割以上（4000nT）に及ぶ大きな磁気異常が探査区域、特に円形花壇周辺及びその南側の

校庭で見られる。一方、地中レーダ探査を実施した探査域の北側ではほぼ一様な値となり、南側のような顕著な磁気異常は存在しない。なお、校舎近くの大きな正の磁気異常は人工的なものである。このように校舎は測定に大きな障害となるが、ここでの磁気異常値が大きいため、例えば北部の比較的平坦な値分布が示すように、その影響は校舎から離れると相対的には小さくなると考えられる。

4. 磁性体モデル

地下の磁気異常の分布状況を推定するために、モデル計算を実施した。ただし、図9の磁気異常図全体を対象とするのは計算量が多くなるため、特に大きな正異常値が見られるS4測線及びその北延長を対象とした(図9のAB)。計算では図10のような帯磁層(ただし、図には南部分だけを示す)の境界が南北にあるモデルを仮定した。図10のx軸に沿って磁気構造が作る全磁力異常(ΔT)は、Grant and West (1965)によると、

$$\Delta T = 2\kappa T (1 - \cos^2 i \cdot \cos^2 \lambda) \left\{ \sin d \cdot \cos(d - 2\beta) \ln \left[\frac{(x - L \cot d)^2 + (h + L)^2}{x^2 + h^2} \right]^{1/2} + \sin d \cdot \sin(d - 2\beta) \left(\tan^{-1} \frac{x - L \cot d}{h + L} + \tan^{-1} \frac{x}{h} \right) \right\}$$

ただし、 $\beta = \tan^{-1}(\tan i / \sin \lambda)$

と表せる(詳細は半田ほか(1989)を参照)。 κ は帯磁率、 T 、 i はそれぞれ地磁気的全磁力、伏角で、ここでは47868nT、 $47^\circ 20'$ とする。 λ は構造の走行で、 90° と仮定した。 d は層端の傾斜角、 h は帯磁層の上端から観測点(センサー)までの高さ、 L は帯磁層の厚さであり、これらの値はモデル計算時に変化させた。

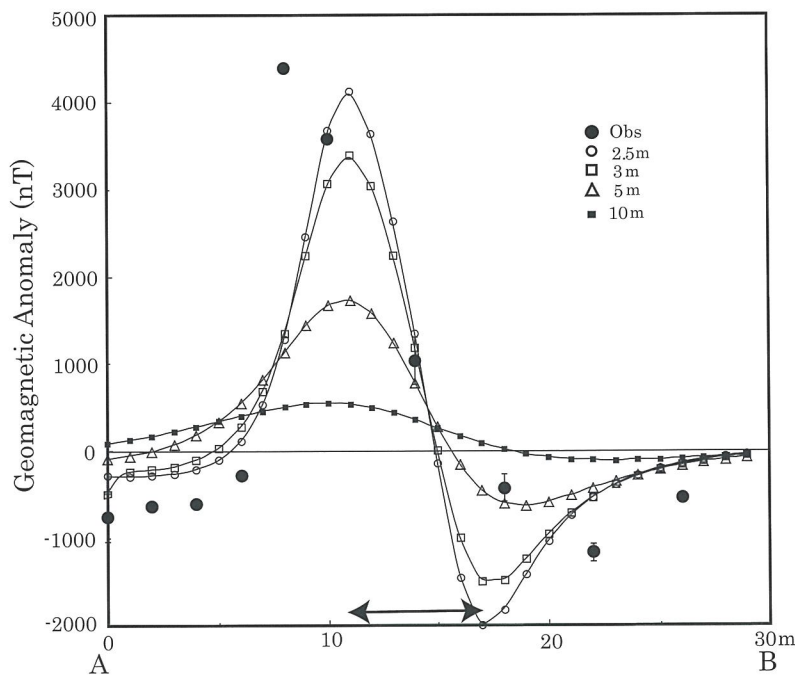


図11 帯磁層の上端から観測点までの高さ h を変化させたときの磁気異常の変化。Obsは観測値。帯磁層の南北幅は6m、傾斜角は 70° に固定。両矢印は帯磁層の位置。観測値のエラーバーは $\pm 1S.D.$

図11は、 h を、2.5（センサー高が2.45mであるので、帯磁層上面はほぼ地表面に一致）、3、5、10mとしたときの計算値と、観測値（Obs）を比較したものである。高さ h が大きくなるほど磁場変化は平坦となる。観測された正異常の狭い幅を説明するためには観測点が帯磁層に近いことが必要であり、帯磁層上面が地表近くにある2.5~3mが適当であることが分かる。また同様の理由から、帯磁層の南北の幅は6mが最適である。さらに、このモデルで必ずしもうまく表現されているとはいえないが、 $x=0$ と20m付近の負の異常を説明するためには、南北ともに傾斜角 d は約70°が必要である。このことを考慮して、図11、12は、幅と傾斜角をそれぞれ6m、70°に固定して計算した結果を示している。

図中の矢印は帯磁層の位置を示している。よく知られていることであるが、帯磁層の位置と磁気異常の最大、最小値の生じる位置とは必ずしも一致しない。

図12では磁性体の厚さ（ L ）を変化させたときの磁気異常分布を示した。ただし、すべてのモデルで正の磁気異常のピークが同じになるように $2\kappa T$ 、つまり帯磁率の値を変化させた。この場合も、厚さが増加するほど変化は平坦になる傾向を示す。南側の変化を重視すると、比較的観測値に合うのは $L=1\text{m}$ となるが、 h ほど結果はパラメータに敏感ではないため、このモデルからは正確な層厚を求めるのは困難である。

これらの結果から、ABでは南北幅6m程の帯磁層が地表近くに存在するモデルが測定値を最もよく表現している。この時、 $2\kappa T=23000$ となるが、この値は、例えば島原半島、千々石断層の磁気異常で使用した $2\kappa T=1000\sim 1800$ （半田ほか、1989）より1桁程大きくなる。この比較的大きな帯磁率、及び浅い埋設深度から、この帯磁層は築地反射炉に関する、例えば鉄滓、鉄が付着した反射炉面材等の破片が含まれている層であると考えられる。

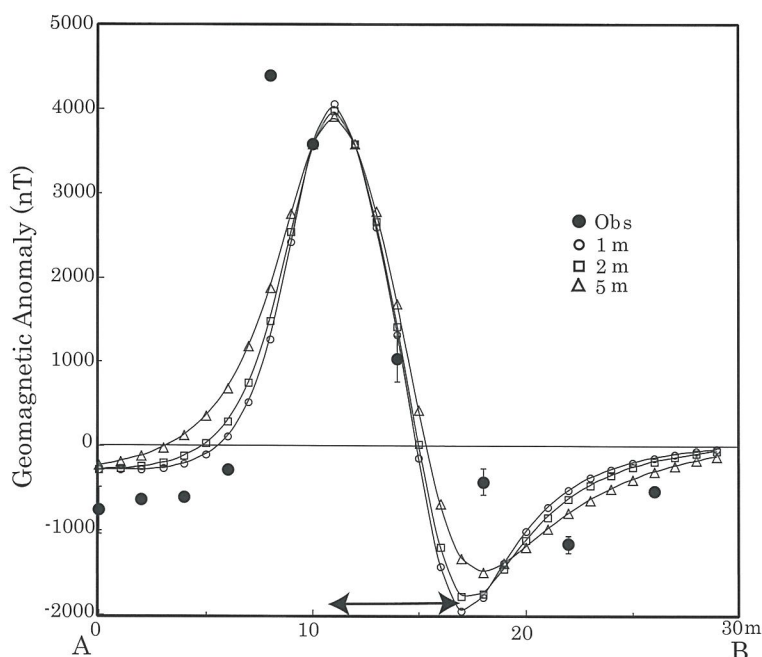


図12 帯磁層の厚さ L を変化させたときの磁気異常の変化。Obsは観測値。帯磁層の南北幅は6m、傾斜角は70°に固定。両矢印は帯磁層の位置。観測値のエラーバーは $\pm 1\text{S.D.}$ 。

5. 探査から推定される遺構、遺物等の位置

図13に、今回の地中レーダ及び磁気探査結果で明らかになった遺物の可能性の高い箇所を、それぞれ四角(C、D、E)及び楕円(F、G、H、K)で示す。佐賀市教育委員会は、2009年12月末から翌1月始めに、地中レーダ探査域に相当する部分のほぼ全域、および円形花壇東部の発掘を行っている。文書報告はまだ得ていないが、これらの結果を参考にして今回の探査結果について考察したい。

地中レーダ反射像で特徴的なのは、測線距離15m付近での連続して存在する強い反射波である(図4、5)。この反射波は、N16測線より西部ではCとEの2本に分かれるように見える。発掘結果によれば、図13のCまたはE域で、幕末の水路跡が存在するが、これに連なる東部のD域では見つかっていない。これは、ここには以前小学校の校舎があり、幕末の地表面が東ほど高くなっているため、水路が存在したとしても東側では校舎建設時に剥離されている可能性が高いからである(佐賀市教育委員会、私信)。

ところで、レーダ反射波では西部、東部いずれも同じような構造に見える。ここでは深部には砂層があり、Dの南で浅くなり、D付近で再び深くなっているらしい。レーダ波がこの砂層表面の急変部で強く反射された

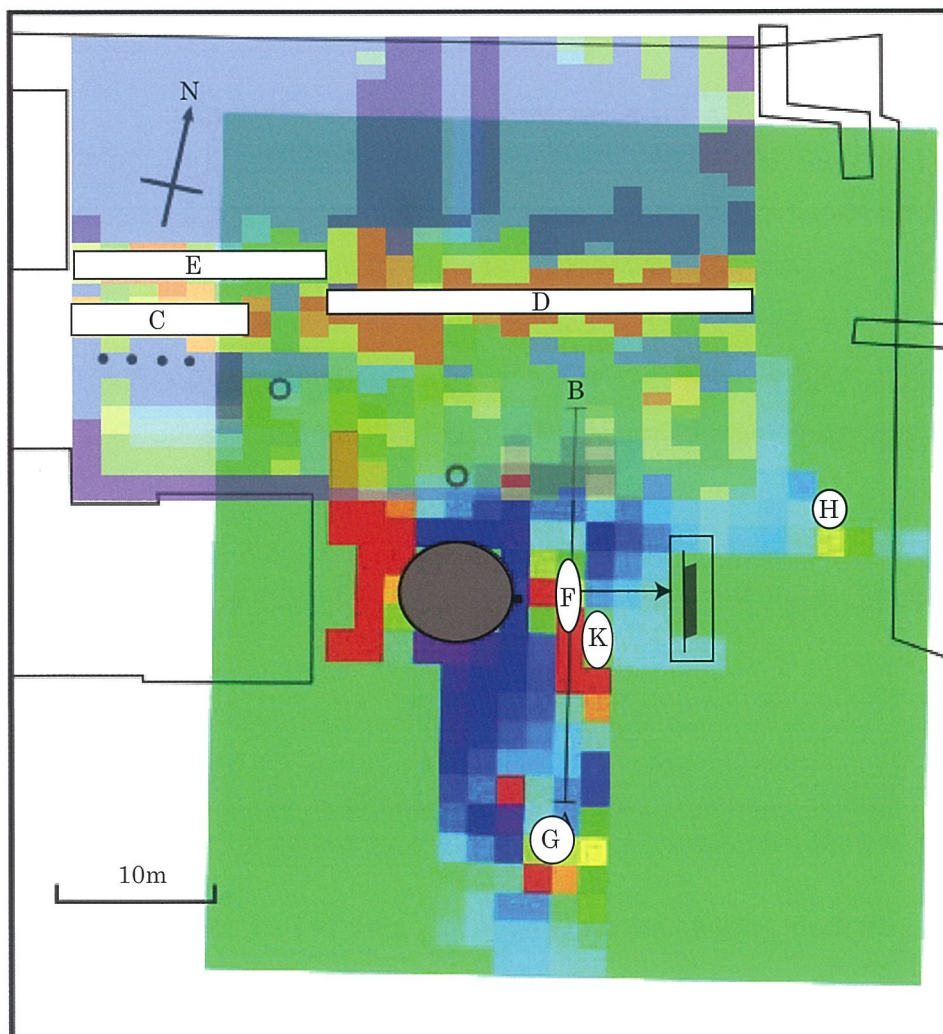


図13 地中レーダ探査(C、D、E)、磁気探査(F、G、H、K)から推定される主要な遺構、遺物等の位置。Fについては、磁気異常モデル計算から推定した鉛直断面図も示した

とも考えられるが、この点については、発掘報告書の刊行を待ちたい。

磁気探査データを用いたモデリングを、図9、13のABで実施した。その結果、大きな帯磁率を持つ長さ6mの領域が、地表近くから存在する可能性が高いことが明らかになった。この帯磁層の位置は、勾配が70°であることを考慮し、また層厚は1mとして、図13のFの横の長方形で囲った部分に示した。図11、12に示したように、帯磁層は一般的には磁気異常の最大、または最小の直下にはない。図9の磁気異常図で、暖色系の箇所がF以外にもあるが、上記、及び北半球では帯磁層による磁気異常はその北側で負に、南側で正になることを考慮すると、この条件を満す異常域はF以外にもG、H、Kの3箇所あり、ここに帯磁した遺物あるいは遺構が存在する可能性が高い。

6. おわりに

幕末に佐賀藩が建築した築地反射炉跡の位置を明らかにするために、その存在が有力視されている日新小学校敷地内で、地中レーダ、高周波CSMT、VLF-MTの電磁波探査、電気探査、及び磁気探査を実施した。直線上に連なる顕著な反射波形が、地中レーダ探査から得られた。その一部は水路跡であるが、他の波形は地下の砂層による可能性も否定できない。しかし、砂層の分布が偶然、直線状であった可能性もあるが、何らかの形で遺構を反映している可能性も捨てきれない。この点は今後の検討に待ちたい。

調査対象が鉄を多量に含む反射炉遺構であることから、磁気探査が有効であることが確認できた。磁気探査では、帯磁した建築物等のノイズの影響を強く受けるが、今回の場合は非常に強い磁気異常であるため、建築物の近傍を除くと、それらの影響は比較的小さい。2010年8月には花壇東で発掘がなされ、大型の鉄滓等の入った廃棄土坑が見つまっているが、反射炉本体はまだ発見されていない（佐賀市教育委員会、私信）。今回の磁気探査で、遺物または遺構の可能性が4か所存在することが明らかになり、特に最南部のGは未調査区間である。今後、特に南部のGを中心として反射炉本体の位置を絞り込む調査を実施していきたい。

謝 辞

本調査に協力頂いた、佐賀市教育委員会、日新小学校に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- Grant F. S. and G. F. West, Interpretation theory in applied geophysics, McGraw-Hill Book Co., p. 319-324, 1965.
- 半田 駿・鈴木 亮・田中良和, 島原半島の磁気異常, 佐賀大学教養部研究紀要, No.21, 27-37, 1989.
- 半田 駿・中田文雄, 佐賀市多布施反射炉跡の地中レーダ探査, 佐賀大学地域学歴史文化センター研究紀要, No.3, 75-82, 2008.
- 板井秀典・半田 駿・北村良介・吉田雄司, 高周波CSMT装置を用いたニアフィールド領域での地下壕探査, 物理探査, 58, 147-155, 2005.
- 長野暉, 佐賀藩と反射炉, p206, 新日本出版社, 東京, 2000.

(半田 駿：佐賀大学地域学歴史文化研究センター長・農学部教授)

(平山明日香：佐賀大学農学部)

(中田文雄：川崎地質株式会社)

(吉田雄司：九州計測器株式会社)

(板井秀典：ジェオクロノロジージャパン株式会社)