

地中レーダーを用いた巨大津波痕跡の高精度イメージング探査実験 —厚岸町史跡国泰寺跡浅層地下と床潭沼の湖底堆積物の研究例—

七山 太^{1,CA}・村上文敏¹・重野聖之²・熊崎農夫博³・添田雄二⁴・古川竜太¹

1 独立行政法人 産業技術総合研究所 地質情報研究部門

2 明治コンサルタント株式会社

3 厚岸町海事記念館

4 北海道開拓記念館

CA: 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第7

電話 0298-61-3967 (PHS), Fax 0298-61-3747

E-mail: nanayama-f@aist.go.jp, <http://staff.aist.go.jp/nanayama-f/>

キーワード: 地中レーダー, 沿岸低地, 巨大津波, 北海道東部, 厚岸町, 史跡国泰寺跡, 床潭沼, 津波堆積物, 完新世後期

1. はじめに

地中レーダー(Ground-Penetrating Radar: GPR)は地面に電波を発信してその跳ね返りを受信することで地下構造を明らかにするための物理探査装置である。比較的安価で構造がシンプルであるため、既に様々な分野において普及し、実用化されている。近年地層研究の分野においても、深度 10m以浅の調査に使用されはじめている。我々の研究では、電波の跳ね返りは堆積物の密度、粒度鉱物などの変化を反映するため、この探査手法は海浜堆積物の堆積構造の可視化にも有効であることが判明しつつある。特に GPR による記録は、2次元の同時時間線の解析にすぐれていることから、過去の地形変化を詳細に追跡することが可能であり、ボーリングデータと併用することによって堆積環境データや年代値と合わせた高時間分解能の時系列の総合的な解析が可能になることが期待されている。

我々は、GPR を用いた海浜堆積物の探査手法の開発実験を、千葉県九十九里浜平野および鳥取県弓ヶ浜半島において実施し、その結果、GPR がこの種の沿岸低地

を対象とした調査に適していることが判明している(村上ほか, 2006).

北海道東部太平洋沿岸域は, 地震津波の常襲地帯であることがよく知られている(第1図). 近年, この地域(十勝〜根室沿岸)の沿岸低地では, 400-500 年周期で発生した巨大津波が陸上に残したと考えられる津波堆積物に関する研究が行われている(Nanayama et al., 2003). 今回の我々の GPR 探査の目的は, この地の沿岸低地に残された地震痕跡や津波痕跡調査への GPR の応用の可能性を検討することにある.

2. 調査地域

今回の探査実験は, 厚岸町教育委員会の協力を受け北海道厚岸郡厚岸町の史跡国泰寺(平成 18 年 2 月および平成 19 年 2 月)と床潭沼(平成 18 年 10 月)で実施された(第 2 図).

(1) 史跡国泰寺跡

厚岸町市街地には 1804 年に建立された国泰寺があり, 当時の敷地(現国泰寺の門前)は史跡国泰寺跡として保存されている. また, この寺院には建立以降約 60 年間書き継がれた寺務日誌, 日鑑記が現在も保管されている. この日鑑記には, 道東地域において最も古い地震津波の被災記録, 即ち 1843 年(天保十四年)十勝沖地震津波についての記述がある. これによると, 同津波によって, 現国泰寺の眼前に広がる低地に建っていた旧会所あたりが“大海のように覆われた.”とされる.

1952 年十勝沖地震津波の厚岸地域周辺における記録としては, 愛冠岬北方の北海道大学付属厚岸臨海実験場付近で波高 3.0 m, 旧渡し船場付近(厚岸湖と厚岸湾の境界付近で, 現在の厚岸大橋のたもと付近)で波高 1.5 m という報告がある. 但し, この地震によって, 汐見川低地まで津波が到達したという報告はない(十勝沖地震調査委員会, 1954).

我々は, 平成 15 年 5 月に, 厚岸町市街地に位置する史跡国泰寺跡において, 先史・歴史時代の津波痕跡を調査するため, 大型重機を用いたトレンチ掘削調査を実施した. その結果, 過去 3400 年間にこの地を襲った 8 層の巨大津波の痕跡を発見し, これを厚岸町民に公開した. その際, トレンチ壁面において大型はぎ取り試料を作成し, これを厚岸町教育委員会に展示物として寄贈した.

(2) 床潭沼

床潭沼は厚岸湾の東側出口に位置しており, 沼の周囲約 2.5km, 面積約 10ha で, 南北約 600m, 東西最大 450mと南北に伸張し太平洋に面した海跡湖である(高山,

1984). 現在の床潭沼と太平洋は幅 250~400m, 標高約 3m の砂州で区切られており, 砂州の上には住宅が多数建設され, 沼の南部の埋め立ても過去に行われたらしい. 沼の周囲には岩質の脆い根室層群が分布し, それゆえに地すべりが多発している. 水深は全般に 1~2m と浅く, 沼南西部に 3.5m の最深部を持つが, 底質も軟泥主体である(高山, 1984). 沼の水は, 周辺の沢地から数本の小川と浸透水によって涵養され, 南端の床潭川によって唯一流出しているが, 満潮時や波浪時の潮の逆流は知られていない.

床潭沼に来襲した歴史津波として, 1843 年北海道東方沖地震津波と 1952 年十勝沖地震津波が知られている. 前者によって床潭の集落が大被害を被った史実が, 日鑑記に記されている(羽鳥, 1984).

1952 年十勝沖地震津波の際には, 3 波の津波の来襲が記録されているが, このうち第 1 波は波高 5m 以上の大津波で, 海岸部で高さ 2m くらいに碎波したものの, その後約 400m 遡上したと言われている. この際, 床潭川を津波が遡上し, 船が流された(住民の証言). この津波によって, 死者 2 名, 重傷 4 名, 倒壊家屋 37 戸, 床上および床下浸水は約 100 戸におよび, 漁船等の漁協関係の被害が多く, 集落民のほとんどが被害を被った.

3. 研究手法

GPR は, 産業技術総合研究所の沿岸都市地質研究グループが所持するカナダ Sensors & Software 社の pulseEKKO100 を使用した. 今回は 100 MHz と 200 MHz の送受信アンテナを併用して探査を実施した. この際, 送受信アンテナ間隔 1m, 測点間隔 0.25m の条件で反射法調査を行った. なお, 堆積層の電磁波速度は Common mid-point 観測結果から求めた. さらに, 地中レーダー記録の地形補正を行うために標高測定を探査と同時に水準測量によって実施した. さらに測線の末端では, GPS を用いた緯度経度の測定を実施した.

(1) 史跡国泰寺跡

史跡国泰寺跡の探査測線は, 平成 15 年度に実施したトレンチ掘削地点(茶色で塗色; 添田ほか, 2004)を基準として, 北東—南西方向の 2 測線(KT04: 200MHz および KT06: 100MHz): 各測線長 31m)とそれに直交する道路に平行な 2 測線(KT01: 100MHz および KT03: 200MHz): 各測線長 28m, 31m)を設定した(第 3 図).

(2) 床潭沼

床潭沼においては, 厳冬期(1~3 月)に湖面が凍結することを利用して, 汀線から

北側の砂州を越え、床潭湖の中心を通るように測線を設定した。そして、氷上の 7 地点 (Site A, Site 0 ~ Site 5) においてボーリングを実施し、それぞれ 100~250cm のコアを回収した (第 6 図)。その後、Site A と Site 0 間において GPR 探査実験を行い、採取したコアと比較検討を行った。

4. 結果

(1) 史跡国泰寺跡

史跡国泰寺跡では既にトレンチ調査が実施され、その詳細は添田ほか (2004) によって報告されている。これによれば、表層は 7~200cm の盛り土に被われ、その下位には 160cm 程の泥炭層が認められ、その中に 8 層の津波砂層と 5 層の火山灰層 (樽前山起源 Ta-a: 1739 年, 駒ヶ岳起源 Ko-c2: 1694 年, 樽前山起源 Ta-b: 1667 年, 白頭山起源 B-Tm: 約 1000 年前, 樽前山起源 Ta-c: 約 2500 年前) が共在される。泥炭層の基底には内湾成泥層が厚く存在し、既存のボーリング資料を参照するならば、その層厚は 10m 以上見積もられる。

今回の探査実験の結果、100MHz では現地表から 4m 程度、200MHz では 3m 程度のイメージングが出来た (第 4 および 5 図)。但し、4 枚の記録とも付近の構造物からの反射によって生じるノイズが認められた。但し、盛り土と泥炭層 (Peat)、および泥炭層と内湾成泥層 (Bay mud) の境界は比較的明瞭に認められた。特に後者は標高 0m に位置し、Holocene marine limit (HML; Maeda et al., 1992) に対比される。さらに、厚岸地域の HML 直上の泥炭層の ^{14}C 年代は 3070 ± 90 yr BP (Maeda et al., 1992) が知られており、これらは暦年補正を加味すると約 3200-3400 cal. yr BP となる。よって、この地の泥炭層は、過去約 3200-3400 年間に生成されたと解釈される。

さらに泥炭層中の反射面に着目するならば、100MHz では 2 枚、200MHz では 5 枚の水平な明瞭な反射面が認められ、これらは堆積構造の反映と考えられる。泥炭層は空隙が多く、含水率が高いものの、比較的均質であり、反射面を生じる要因は存在しない。よって、これらは泥炭と砂 (もしくは火山灰層?) の物質境界で生じた反射面と考えてよいであろう。一般に GPR 記録の垂直解像度は物質内の伝搬速度によって規定され、湿潤砂では 100MHz で 27-34cm, 200MHz では 13.5-17cm が基準値である。泥炭層では、これよりもやや大きめの数値を示すと考えられる。よって、100MHz で 30-50cm, 200MHz で 20-25cm がこの条件での GPR 探査記録の解像度の精度限界と推定される。

また、今回の地中レーダー探査によって、反射面の異常な屈曲が認められた (第 4

図). これらは未知の埋蔵物(遺跡?)を示す可能性があり, この後, 掘削調査によって確認することが望まれる.

(2) 床潭沼

予察的なボーリング解析の結果, 水深は 1~2mで, 湖沼底には 3m以上の有機質な泥層(Lake mud)が堆積していることが判明しており, その中には国泰寺トレンチと同様な火山灰層や津波砂層の挟在が推定される.

床潭沼での氷上探査実験は, 100MHz のアンテナのみを用いて実施した. その結果, 探査深度は氷上から概ね 5mであり, 水塊の厚さや湖底の地形も反射面で明瞭にイメージングされている(第 7 図).

泥層中の反射面に着目するならば, 7 枚の緩く海側に傾斜した反射面が認められる. これらは湖底面と平行であり, 堆積構造と判断できる. 湖底付近の泥層は含水率が高いものの比較的均質であり, 反射面を生じる要因は存在しない. よって, これらは泥と砂(もしくは火山灰層?)の物質境界で生じた反射面と考えてよいであろう. 一般に泥層では砂層中よりも伝搬速度が遅くなるために, 100MHz で 27-67cm の垂直解像度となる. よって, 27-67cm が, この条件下での GPR 探査記録の解像度の精度限界と推定される.

5. まとめと今後の課題

今回の探査実験の結果, 津波痕跡調査への GPR 探査の有効性が証明された. 現状では解像度(25~50cmオーダー)でやや問題が残るものの, ①湿原環境や湖沼の氷上において使用できたこと, ②探査深度が 3~5m程度確保できたこと, ③泥炭層や氷+湖水を透過して, その下位の堆積物内部のイメージングが出来たこと, ④泥炭層や湖成泥層に挟在される津波堆積物の層準が明瞭な反射面として認識できたこと, これら 4 つの成果は, この分野での GPR 研究の発展を示唆している.

史跡国泰寺跡で実施された GPR イメージング結果は, 今後, 添田ほか(2004)で報告されているトレンチ断面の堆積物物性値と詳細に対比され, 個々の反射面の成因に関して詳細に議論を行う予定である. 一方, 床潭沼においては, 平成 19 年 2 月に氷上ボーリングを再度実施し, 掘削長 4m のコアを 2 地点から得ることが出来た. これらのコアを用いて, 堆積物物性値と反射面との対応を同様に検討する予定である.

6. 付録—床潭沼氷上ボーリングの予察的成果—

平成 18 年 2 月、我々は床潭沼において、GPR 探査と並行して氷上ボーリングを行い、総計 7 本のコアを採取した。それを解析した結果、17 世紀と 13 世紀の巨大津波痕跡の下位にも少なくとも 2 層のイベント堆積物の存在を認識することが出来た(第 6 図)。これらは浸食基底を伴う層厚 0.5-30 cm の砂礫層を有機質泥が被っており、湖沼に流入したタイプの津波堆積物の層相に酷似する。さらに、これらのイベント層序は添田ほか(2004)と整合的であり、床潭沼地域は他の道東地域と同様に、400-500 年毎に巨大津波の来襲を受けていたと考えるのが、現状では妥当であろう。

一方、今回、駒ヶ岳起源の Ko-c1(1856 年)と樽前山起源の Ta-a(1739 年)火山灰層 との間にも、新たに津波堆積物が発見された。これは日鑑記に記載された道東最古の地震津波記載である 1843 年天保大津波の痕跡を示していると考えてよいであろう。しかし、1952 年 3 月 4 日に床潭で大きな被害をもたらした十勝沖地震津波の痕跡は今回の解析では全く認識できなかった。床潭の住民の証言に基づけば、被災時の床潭沼は人が歩いて逃げることが出来る氷結した状態であり、津波は氷上を滑るようにゆっくり遡上したために、この際、湖沼底の攪拌が激しく起こらなかったものと考えられる。

今後は前述した GPR 記録を加味して、平成 19 年 2 月に新たに採取した 2 本の長尺コアを解析することによって、厚岸地域の歴史へ先史津波カタログを編纂することを目指したい。

7. 謝辞

今回の GPR 探査実験は、平成 18 年度厚岸湖・別寒辺牛湿原学術研究助成、および文部科学省科学研究費基盤 C(2)(代表者:七山 太, 課題番号 16540423)を用いて実施された。厚岸町海事記念館の北川勝雄館長ならびに厚岸水鳥観察館の澁谷辰生氏ほか関係各位に対し、心から感謝する。

8. 引用文献

羽鳥徳太郎, 1984, 天保十四年(1843 年)北海道東部津波の波源域, 東大地震研彙報, 59, 423-431.

Maeda, Y., Nakada, M., Matsumoto, E. and Matsuda, I., 1992, Crustal tilting derived from Holocene sealevel observations along the east coast of Hokkaido in Japan and upper mantle rheology. *Geophysical Res. Let.*, 19,

857-860.

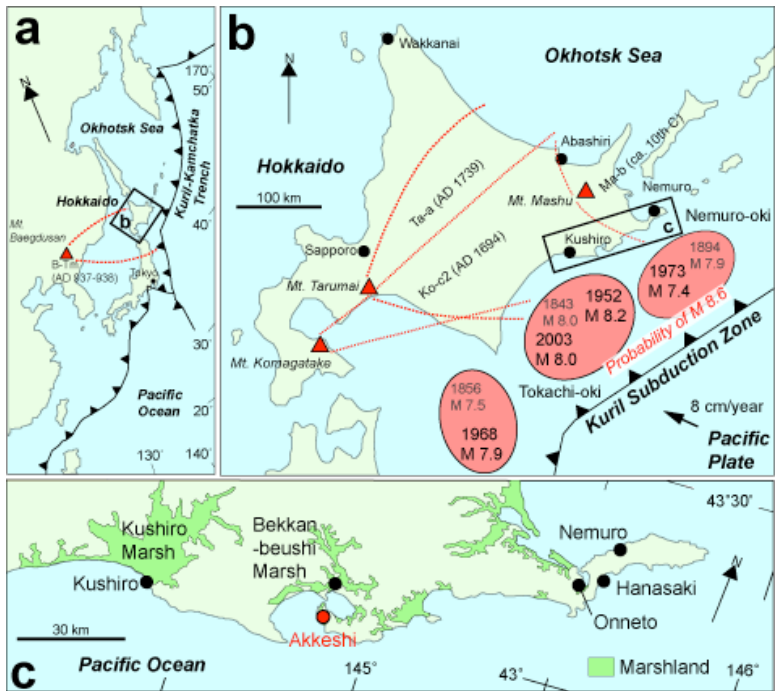
村上文敏・田村 亨・七山 太・斎藤文紀・渡辺和明, 2006, 地中レーダーを用いた海浜堆積物の探査手法の開発. 地質調査総合センター研究資料集, no. 445, 12-13.

Nanayama, F., Satake, K., Furukawa, R., Shimokawa, K., Shigeno, K., Atwater, B.F., August 2003, Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril Trench. *Nature*, 424, 660 – 663.

添田雄二・七山 太・重野聖之・古川 竜太・熊崎農夫博・石井正之, 2004 年 12 月, 北海道東部, 厚岸町汐見川低地において発見された巨大津波の痕跡とその広域イベント対比. 地質学論集, no. 58, 63-75.

高山末吉, 1984, 道東海岸線における河川湖沼のプランクトン及び底生動物. 道東海岸線総合調査報告書, 釧路市立博物館, 187-209.

十勝沖地震調査委員会, 1954, 十勝沖地震調査報告. 1018p.



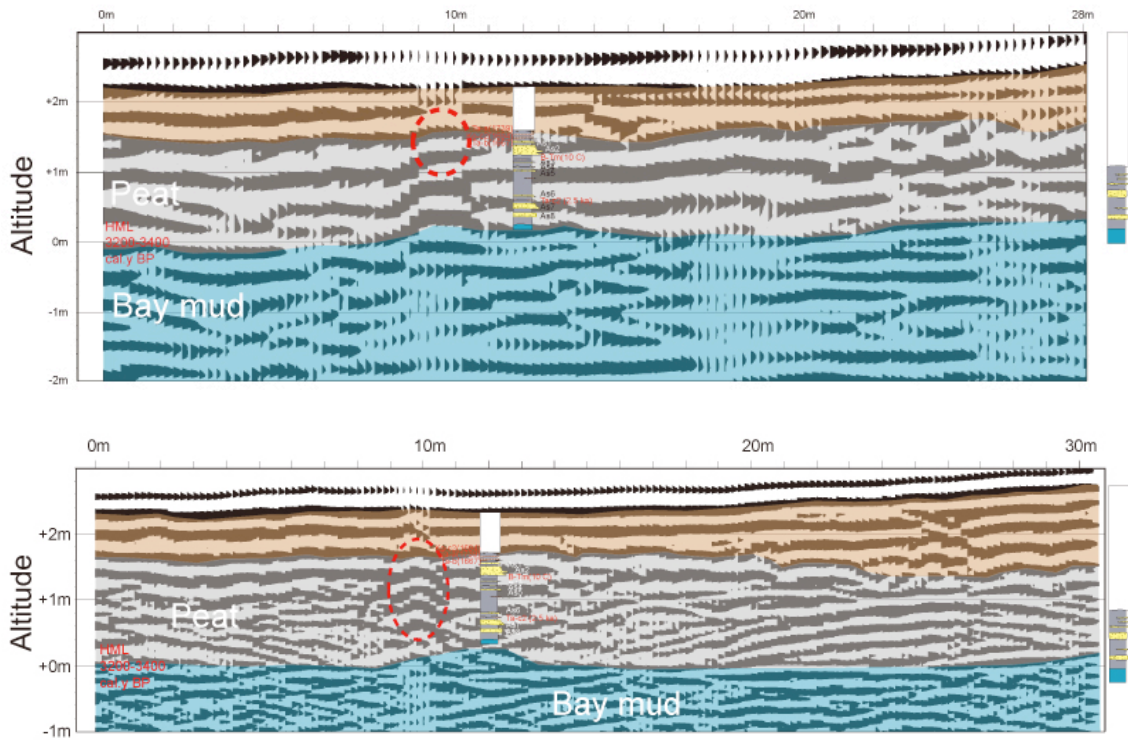
第1図. 北海道南東部, 千島海溝沿岸域における海溝型地震の震源域 (a, b), 道東太平洋沿岸地域の地形図および厚岸町 (c), 史跡国泰寺跡および床潭沼の位置図 (d). サテライトイメージ作成には Google Earth を使用した.



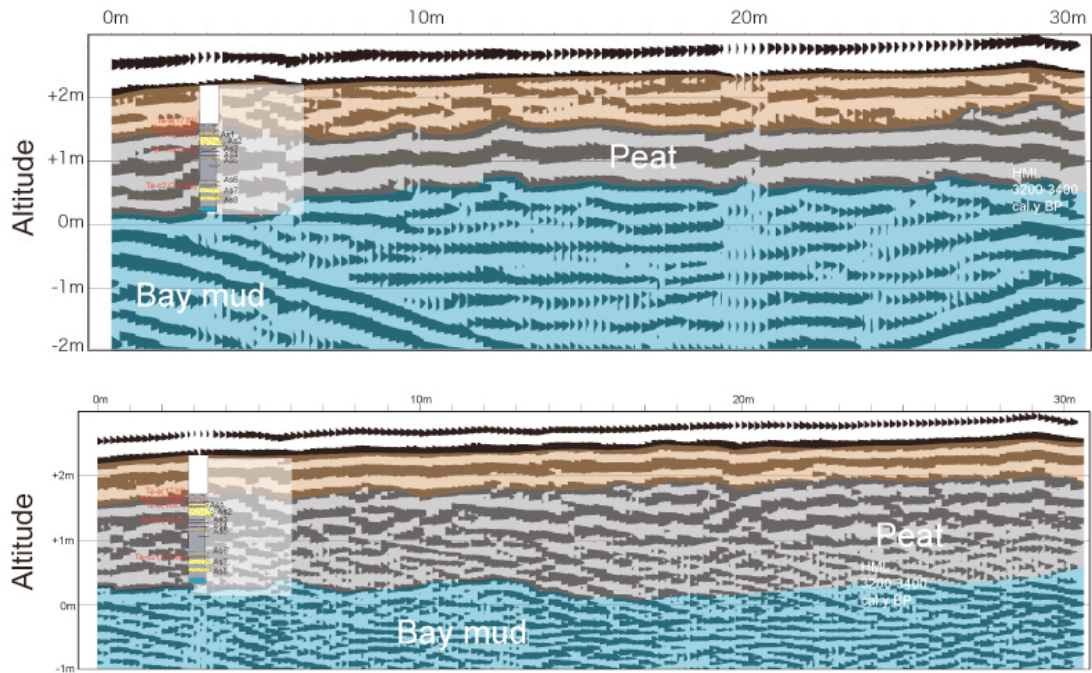
第 2 図. 史跡国泰寺(a)および床潭沼氷上(b)での GPR 探査.



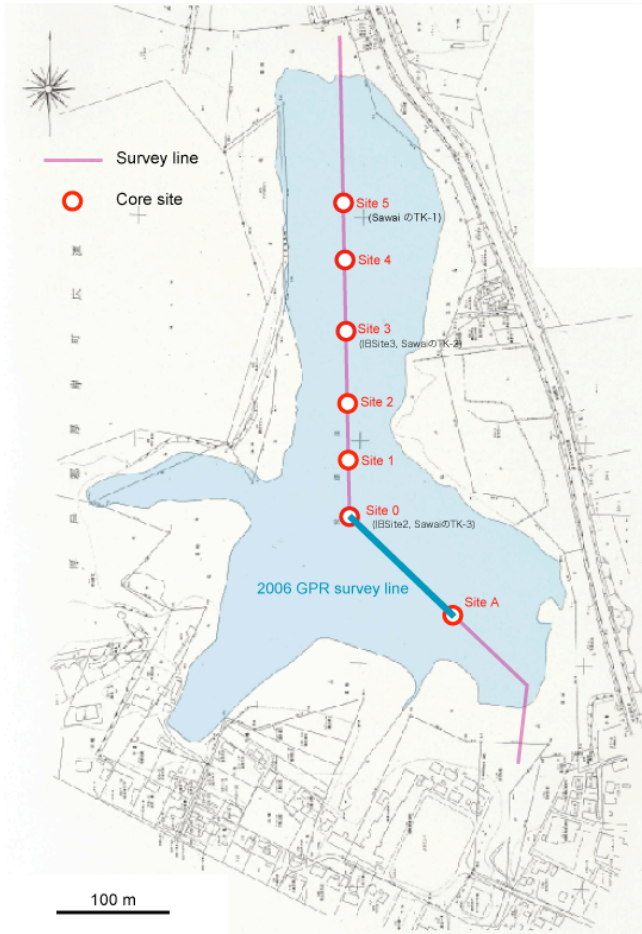
第 3 図. 厚岸町史跡国泰寺跡における GPR 探査測線図. カッコ内の数量は探査距離, 黒字の数字は代表的な標高(m)を示す. 2003 年トレンチ調査の詳細は, 添田ほか(2004)に記述されている.



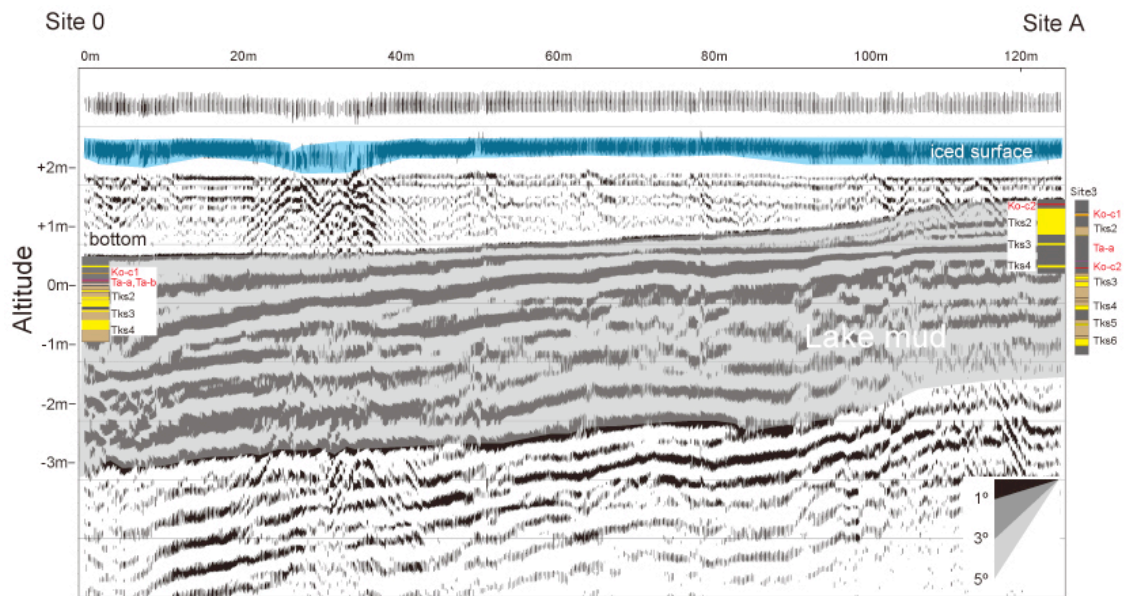
第4図. 厚岸町史跡国泰寺, KT01 (100MHz)(上)および KT03 (200MHz)(下)の GPR 探査記録. 堆積柱状図は添田ほか(2004)から引用. 泥炭層(Peat)内の反射面群が津波堆積物の層準を示唆している. 赤丸は遺物を示唆する反射面の屈曲を示す



第5図. 厚岸町史跡国泰寺, KT06 (100MHz)(上)および KT04 (200MHz) (下)の GPR 探査記録. 堆積柱状図は添田ほか(2004)から引用. 泥炭層(Peat)内の反射面群が津波堆積物の層準を示唆している. 白抜きは 2003 年の国泰寺トレンチの掘削空間を示す.



第6図. 厚岸町床潭沼における氷上ボーリング地点とGPR探査測線位置図.



第7図. 厚岸町床潭沼の氷上GPR探査記録.