

地中レーダを用いた湖底津波堆積物の イメージング探査実験

重野 聖之¹⁾・七山 太²⁾・村上 文敏²⁾・熊崎農夫博³⁾
堤 康夫³⁾・桂川 実³⁾・古川 竜太²⁾・中川 充²⁾

1. はじめに

現在の地球温暖化を議論するうえにおいて、最も深刻な問題は地球温暖化に伴う海面上昇である。更に現在気候条件の良い中緯度地域においても、今よりも遙かに台風、サイクロンやハリケーン等の暴浪の来襲によって沿岸災害が増加することも考慮しなくてはならない。そして環太平洋造山帯に位置する我が国は、今より一層津波災害にも備えていく必要に迫られる。この種の大規模波浪によってもたらされる深刻な問題の一つに、沿岸浸食とそれに伴う港湾や居住地域への土砂流入による災害があげられる。2004年12月26日に起こったインド洋大津波による被災後、研究者によって、インド洋沿岸で生じた大規模な沿岸浸食や低地への土砂移動の状況が詳細に報告されている。一方、2005年8月のハリケーンカトリナによる暴浪災害により、米国メキシコ湾岸のバリア島では、この際、大規模な沿岸浸食や越流扇状地堆積物が生じたことが報告されている。更に、沿岸堆積物中に保存されている大規模波動の痕跡(浸食面やイベント堆積物)から、津波や大規模なハリケーンの発生間隔について評価した研究が、世界各地において知られている(例えば、Meyers *et al.*, 1996; Nanayama *et al.*, 2003; Buynevitch *et al.*, 2004, 2007)。

地中レーダ(Ground-Penetrating Radar: 以下GPR)は、電波の地層からの反射を利用して地下構造を明らかにする物理探査装置である。電波の反射は堆積物の密度、粒度、重鉱物組成、含水率などを反映した電気的特性(特に誘電率)に依存するため、この探査手法は、1980年代後半以来、欧米では地層の可視化に使用されはじめていた。特にGPR記録上の反射

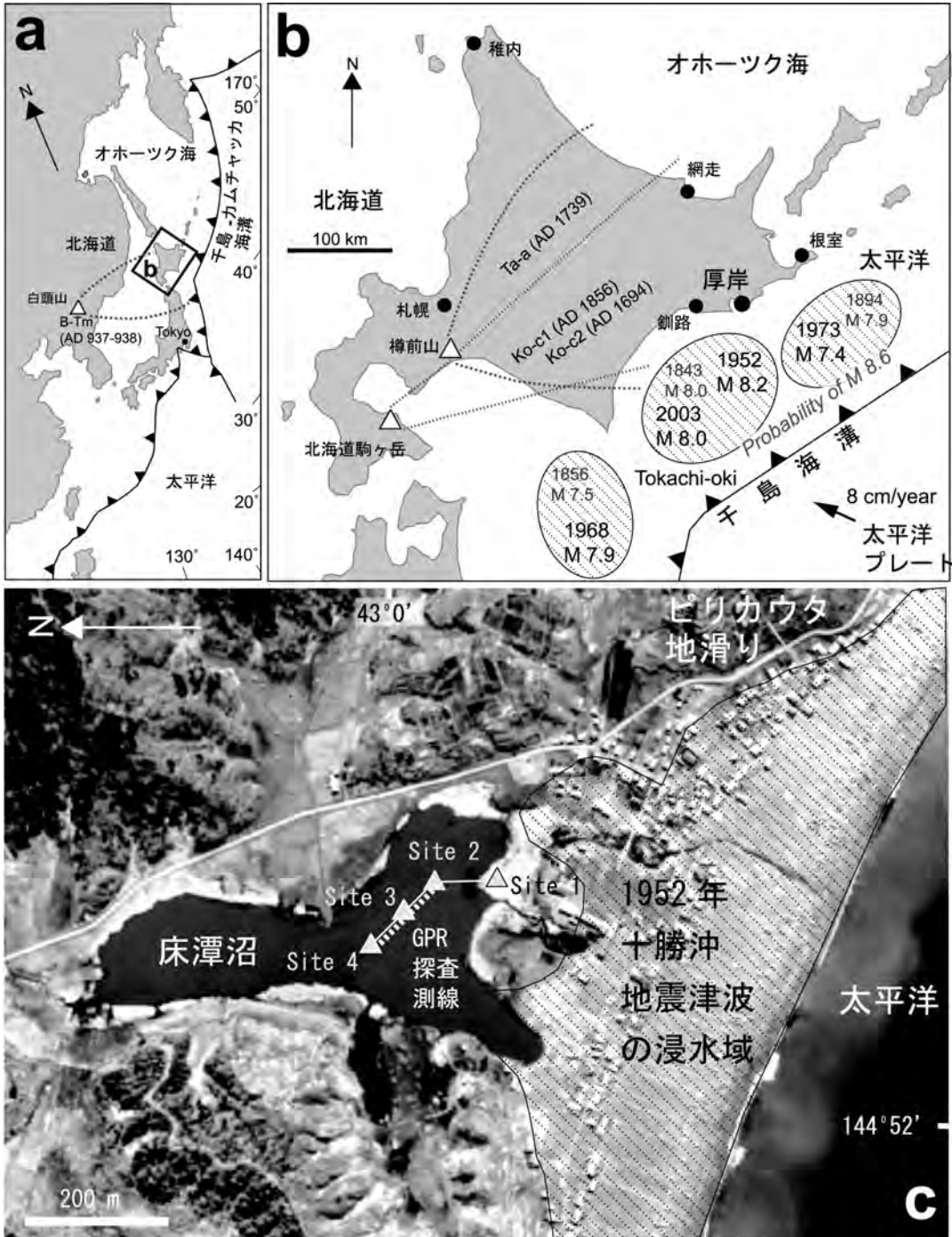
面は等時間面として捉えられ、これを用いて過去の地形変化を2次元もしくは3次的に追跡することが可能である。更に、GPR記録と掘削データの併用により堆積環境や年代値と合わせた時系列解析が可能となる。我々はGPRを用いた海浜堆積物可視化実験を産総研・内部競争的予算を用いて千葉県九十九里浜平野および鳥取県弓ヶ浜半島において実施し、その結果、GPRがこの種の沿岸低地を対象とした調査に適していることが判明している(村上ほか, 2006, 2008; 田村ほか, 2008)。

ところで、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地震(M8.6?)が沿岸湿原や海跡湖の湖底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(例えばNanayama *et al.*, 2003, 2007)。このうち厚岸地域における既存研究例としては、七山ほか(2001)、Sawai(2002)、添田ほか(2004)があげられる。七山ほか(2001)は、海跡湖である床潭沼の湖底堆積物を採取して詳細に解析し、少なくともここに3層の津波堆積物が存在することを報告した。このうち、17世紀と13世紀に発生したとされる巨大津波の痕跡は、Ta-a(1739年樽前山)火山灰層、Ko-c2(1694年駒ヶ岳)火山灰層、Ta-b(1667年樽前山)火山灰層、約10世紀のB-Tm(白頭山-苫小牧)火山灰層を鍵層として、史跡国泰寺跡周辺でも同様に確認され、さらに、これらは道東部太平洋沿岸域において広域対比されることが明らかにされている(Nanayama *et al.*, 2003)。

今回の我々のGPR探査実験の目的は、厳冬期に全面結氷する海跡湖において、氷上からの湖底堆積物

1) 明治コンサルタント株式会社 本店
2) 産総研 地質情報研究部門
3) 厚岸町 海事記念館

キーワード: 地中レーダ, 海跡湖, 氷上GPR, 巨大津波, 北海道東部, 厚岸町, 床潭沼, 津波堆積物, 完新世後期



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、道東太平洋沿岸地域の地形図および厚岸町の位置および広域テフラ(Ta-a, Ko-c2, B-Tm)の分布図(a, b)、厚岸町床潭沼における氷上ボーリング地点(Site 1～Site 4)、GPR探査測線位置図(1967年国土地理院によって撮影された空中写真を基図として利用)および床潭地域における1952年十勝沖地震津波による浸水域(十勝沖地震調査委員会, 1954)(c)。

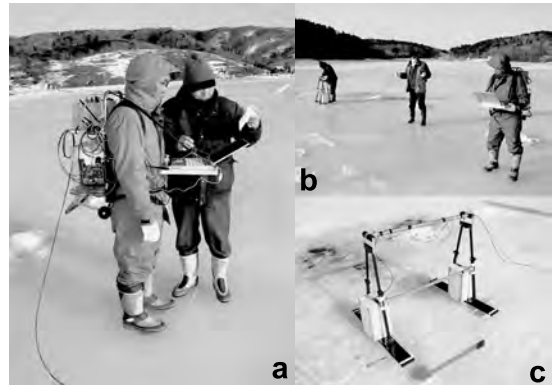
の可視化の可能性について言及することにある。もしこの手法が確立できれば、北海道のような高緯度地域の海跡湖底に残された地震痕跡や津波痕跡のGPRを用いた非破壊探査が可能となる。このような水上からの湖底堆積物可視化の試みは、Buynevitch and FitzGerald (2003) によって、アメリカ北東岸メイン州の海跡湖において実施されているが、我々の知る限りこの種の先行研究は限られている。

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て厚岸町床潭沼(平成18年2月)において実施された(第1図)。

床潭沼は厚岸市街地南東部に位置する海跡湖であり、太平洋に直接面している。沼の周囲約2.5km、面積約10ha、南北幅約600m、東西幅最大450mと南北に伸張した形態を示す(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、砂州の上には床潭の集落が位置し、その為沼の周辺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後期白亜系~前期古第三系根室層群(君波, 1978)が広く分布し、それゆえに地滑りが多発している(納谷ほか, 1997; 田近, 1995)。沼の水深は全般に1~2mと浅く、南西部に3.5mの最深部が存在する。現在の底質は淡水性軟泥が主体である(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、満潮時や暴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年天保大津波と1952年十勝沖地震津波が地元では良く知られている。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(十勝沖地震調査委員会, 1954)。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戸に及んだ。さらに、漁船等の漁協関係の被害が多く、集落民の多くが被害を被った。



第2図 床潭沼水上(b)でのGPR探査実験の状況。(a)水上ではBack packer typeの探査手法が有効。(b)探査は3名で効率的に実施可能。(c)100MHzアンテナと水上探査のために保護された送信装置と受信装置のモジュール。

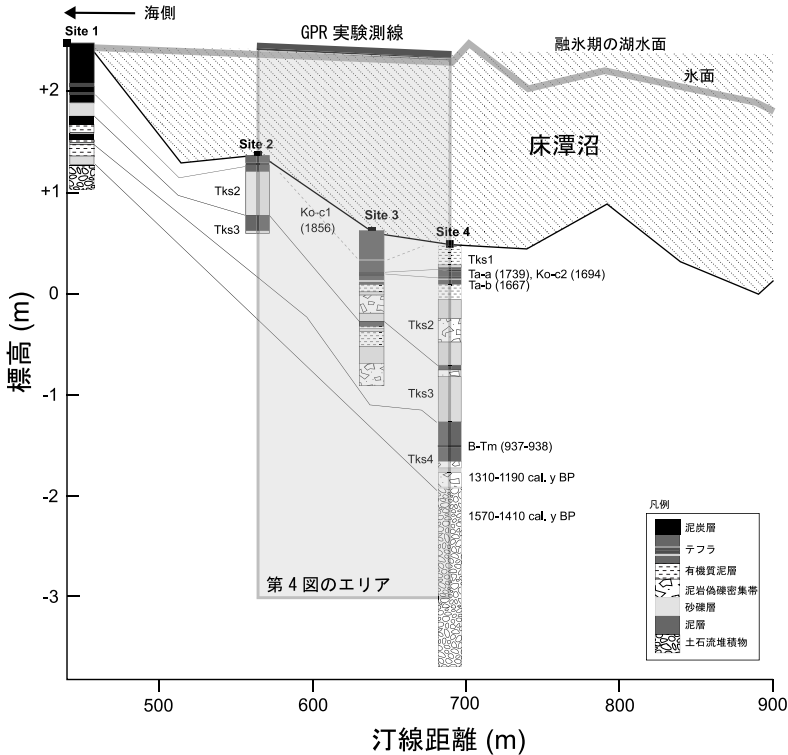
3. 研究手法

厳冬期(1~2月)に床潭沼の湖面が全面結氷することを利用してGPR探査測線を設定した(第1図)。GPR探査後、氷上の4地点(Site 1~Site 4)においてボーリングを実施し、それぞれ100~400cmのコアを回収した。採取したコアを産総研で記載し、GPR記録との比較対比を行った(第2図)。

GPRは、産総研・地質情報研究部門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100MHzの送受信アンテナを用いて探査を実施した。村上ほか(2006, 2008)に従い、送受信アンテナ間隔1m、測点間隔0.25mの条件で、測線距離120mの反射法探査を実施した。この際、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、GPR記録の氷上の凹凸の補正を行うために水準測量を実施した。さらに測線の末端では、GPSを用いた緯度経度の測定を行った。

4. 氷上ボーリングによって明らかにされた湖底堆積物の層序の概要

今回採取した4本の氷上ボーリングコアを解析した結果、七山ほか(2001)の報告した17世紀と13世紀の津波痕跡(Tks2およびTks3)の下位にも少なくとも1層のイベント堆積物(Tks4)の存在を認識することが



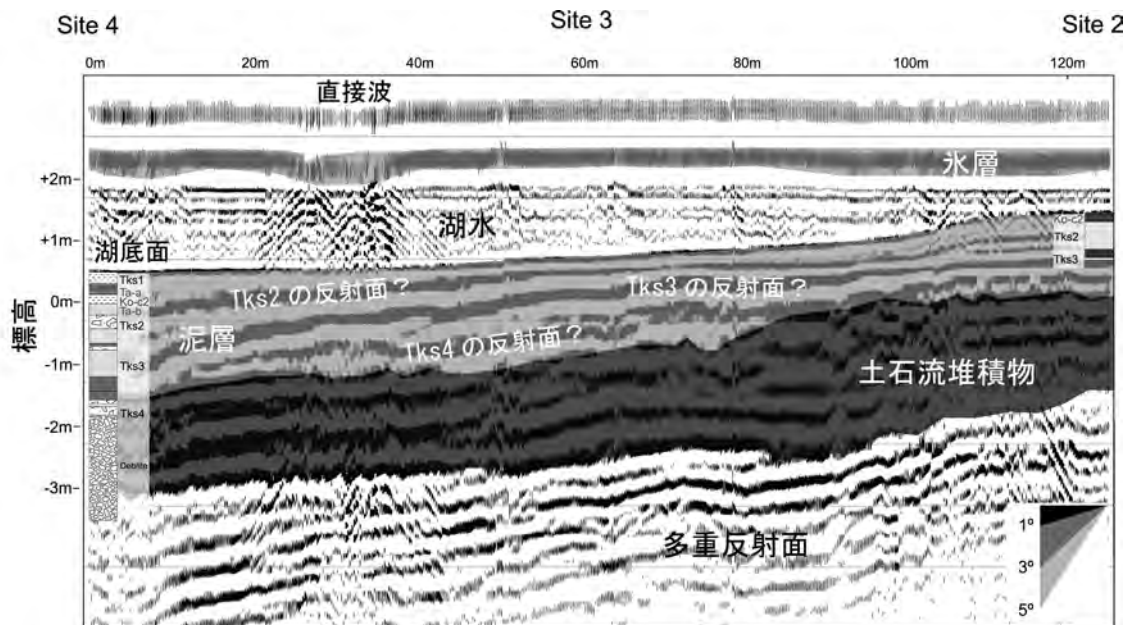
第3図
床潭沼4地点における氷上ボーリングの堆積柱状図と火山灰層に基づく対比。

出来た(第3図)。これらは浸食基底を伴う層厚0.5-30cm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(Nanayama *et al.*, 2003)に酷似する。道東上部完新世の5層の火山灰層(Ko-c1, Ta-a, Ko-c2, Ta-b, B-Tm; 古川・七山, 2006)と炭素同位体年代値に基づくならば, Tks2およびTks3: 17世紀と13世紀, Tks4: 7~8世紀, にそれぞれ発生したことが推定された。このうち, 17世紀と13世紀, 7~8世紀のイベント堆積物は厚岸国泰寺トレンチのAks1~Aks3(添田ほか, 2004)に対比され, 道東太平洋沿岸地域の広域イベント層序に対比されると考えて良いであろう。

一方, 今回, Ko-c1(1856年駒ヶ岳起源)とTa-a(1739年樽前山起源)火山灰層との間に津波堆積物:Tks1が記載された。この地の歴史地震記録を調べてみても, 1856年と1739年の間には, 国泰寺の寺務日誌「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(羽鳥, 1984)以外には該当するものが存在しない。よってTks1は1843年天保大津波の痕跡と認定される。一方, 1952年3月4日に床潭地域で大きな被害をもたらした同じ波源を持つ

十勝沖地震津波の痕跡は今回のコア解析では認識できなかった。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のできる氷結した状態であり, 津波は氷上を滑るように流入したために, この際, 湖底の攪拌がほとんど起こらなかったと考えられる。

更に, 最下位のTks4は, 根室層群霧多布層(君波, 1978)の礫層からの再堆積性の円礫を含む土石流堆積物を浸食基底をもって被っている。厚岸海岸地域は道東屈指の土石流発生地帯であることが知られており(田近, 1995), 床潭沼の東部丘陵も大規模な“ピリカウタ地滑り”(納谷ほか, 1997; 第1図c)の範囲に含まれている。納谷ほか(1997)の地滑りトレンチ調査によれば, 1550±60 ¹⁴C年以降において大規模地震によって溝状凹地が生じ, それ弱線となっており, その後繰り返し地滑りが発生していたことが分かっている。しかもこの地震発生時には, 1993年釧路沖地震(M7.8)や1994年北海道東方沖地震(M8.2)よりも遙かに大きな地震動が生じたことが示唆されている。この際, 床潭沼周辺で地滑り起源の土石流が発生した可能性は容易に想像される。床潭沼湖底において採



第4図 今回の実験で得られたGPR探査記録と堆積柱状図の対比.

取された土石流堆積物の年代は1570-1410暦年を示す。さらにTks4津波堆積物とB-Tm火山灰層によって被われている事実から考察するならば、7~8世紀頃の巨大地震によって地滑りが発生し、土石流が床潭沼に流入し、その直後に津波が床潭沼に遡上し土石流堆積物を被ったと考えるのが妥当であろう(第3図)。

5. GPR探査実験の結果

GPR探査時において、氷の厚さは40cm、水深は1~2mであった。GPR記録の透過深度は氷上から概ね5mであり、それ以深は多重反射によりマスクされ可視化されていない。しかし水塊の厚さや湖底の地形は、予想以上に明確にイメージングされている(第4図)。

上述した氷上ボーリングコアを参照するならば、多重反射面の卓越する湖底下3~4mの層準には厚い土石流堆積物が存在しており、この礫を多く含む固結度の高い堆積層は電磁波が透過できなかったと想像される。次に多重反射面の上位から湖底面までに着目するならば、ここには3枚の緩く海側に傾斜し、連続性の高い明瞭な反射面が認められる。これらは湖

底面とほぼ平行であり、ある種の堆積構造と認識できる。

氷上ボーリングコアの層相と深度で比較するならば、これら3枚の反射面はTk2, Tk3, Tk4層準の津波痕跡と対比可能であることが読み取れる(第4図)。湖底付近の泥層は淡水性であり、含水率が高く有機物を多く含むものの比較的均質であり、その内部には強い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?)の誘電率の差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で湿潤砂は27-34cm、シルトは27-67cmが垂直解像度となる(例えばDavis and Annan, 1989; 村上ほか, 2008)。この分解能では砂層の層厚を見積もることや、さらにTks1の様な薄い砂層を認識することは難しいが、今回の実験で掘削作業を伴わず湖底の津波痕跡のイメージングに成功した成果は重要と言えよう。

6. まとめと今後の課題

今回の探査実験の結果、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氷上で使用できたこと、②探査深度が3~5m程度確保でき

たこと、③氷層+湖水を透過して、その下位の泥質堆積物内部のイメージングが出来たこと、④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研究の発展を明示している。今後、採集されたこれらのコアを用いて、堆積物物性値(含水率・密度・粒度・組成)とGPR記録の反射強度や波形との高精度対比(堆積物物性値と反射強度・波形との関係)を実施する予定である。

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, 厚岸水鳥観察館の澁谷辰生氏, 明治コンサルタント(株)本店の英 弘氏, 石井正之氏, 納谷 宏氏, 北海道開拓記念館の添田雄二氏, ほか関係各位に対し, 筆者一同感謝申し上げる。

引用文献

- Buynevitch, I.V. and FitzGerald, D.M. (2003): High-resolution subsurface (GPR) imaging and sedimentology of coastal ponds, Maine, U.S.A.: Implications for Holocene back-barrier evolution. *Jour. Sed. Res.*, 73, 559-571.
- Buynevitch, I.V., FitzGerald, D.M. and van Heteren, S. (2004): Sedimentary records of intense storms in Holocene barrier sequences, Maine, USA. *Mar. Geol.*, 210, 135-148.
- Buynevitch, I.V., FitzGerald, D.M. and Goble, R.J. (2007): A 1500 yr record of North Atlantic storm activity based on optically dated relict beach scarps. *Geology*, 35, 543-546.
- Davis, J.L. and Annan, A.P. (1989): Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys. Prospect.*, 37, 531-551.
- 古川竜太・七山 太(2006):北海道東部太平洋沿岸域における完新世の降下火砕堆積物. *火山*, 51, 351-371.
- 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.
- 君波和雄(1978):根室層群の層序の再検討. *地球科学*, 32, 120-132.
- Meyers, R.A., Smith, D.G., Jol, H.M. and Peterson, C.D. (1996): Evidence for eight great earthquake-subsidence events detected with ground-penetrating radar, Willapa barrier, Washington. *Geology*, 24, 99-102.
- 村上文敏・田村 亨・七山 太・斎藤文紀・渡辺和明(2006):地中レーダ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.
- 村上文敏・田村 亨・七山 太・斎藤文紀・渡辺和明(2008):地中レーダの海岸平野研究への応用. *地質ニュース*, no.642, 13-18.
- 七山 太・重野聖之・牧野彰人・佐竹健治・古川竜太(2001):イベント堆積物を用いた千島海溝沿岸域における津波の遡上規模の評価-根室長節湖, 床潭沼, 馬主来沼, キナシベツ湿原および湧洞沼における研究例. *活断層・古地震研究報告*, no.1, 251-272.
- Nanayama, F., Satake, K., Furukawa, R., Shimokawa, K., Shigeno, K. and Atwater, B.F. (2003): Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril Trench. *Nature*, 424, 660-663.
- Nanayama, F., Furukawa, R., Shigeno, K., Makino, A., Soeda, Y. and Igarashi, Y. (2007): Unusually nine large tsunami deposits from the past 4000 years at Kiritappu marsh along the southern Kuril Trench. *Sedimentary Geology*, 200, 275-294.
- 納谷 宏・英 弘・渡辺崇史(1997):地震による地盤滑りの初期の亀裂形成-北海道厚岸町ピリカウタン地すべりの事例. *地すべり学会北海道支部(編)地震による斜面災害*. 北海道大学図書刊行会, 69-75.
- Sawai, Y. (2002): Evidence for the 17th-century tsunamis generated on the Kuril-Kamchatka subduction zone, Lake Tokotan, Hokkaido, Japan. *J. Asian Earth Sci.*, 20, 903-911.
- 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):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.
- 田近 淳(1995):堆積岩を起源とする地すべり堆積物の内部構造と堆積相. *北海道立地下資源調査所報告*, no.67, 59-145.
- 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.
- 田村 亨・村上文敏・七山 太・斎藤文紀・渡辺和明(2008):海浜堆積物の地中レーダ記録. *地質ニュース*, no.642, 19-24.
- 十勝沖地震調査委員会(1954):十勝沖地震調査報告. 1018p.

SHIGENO Kiyoyuki, NANAYAMA Futoshi, MURAKAMI Fumitoshi, KUMASAKI Nobuhiro, TSUTSUMI Yasuo, KATSURAGAWA Minoru, FURUKAWA Ryuta and NAKAGAWA Mitsuru (2008): Imaging investigation of the lacustrine tsunami deposits using ground-penetrating radar.

<受付:2007年11月30日>