

浅層地下の大型定方位試料採取法のツールとしての改良型 ACE ライナー：液状化 – 流動化調査工事への応用

重野聖之^{1), 2)}・鈴木喜之²⁾・福岡 哲³⁾・風岡 修⁴⁾・吉田 剛⁴⁾・七山 太^{5), *}

1. はじめに

我々の主な生活面である沖積低地の未固結の地層を採取し、その成り立ちを考えることは大変重要な研究課題の一つである。特に、2011年東日本大震災以降、地震・津波、台風・高潮、斜面崩壊、火山噴火等の自然災害の発生時期、間隔を見積もる地質学的手法を用いた防災減災に関わる基礎研究が、日本各地において実施されている。

これらの基礎研究を実施するにあたって、これまで大きく3つの調査方法が実施されてきた(第1表)。深度5m以下で、地層の広がりや構造の把握が必要な場合はトレンチ掘削が有効とされる。但し、調査用地を確保する必要があり、現況復旧にも考慮が必要であった。この点、ボーリングは調査用地を確保しやすく、深度管理も正確であるのが最大の利点である。但し、採取された試料の孔径は5~10cm程度と視野が限られており、その分、情報量が少なくなる。一方、最近普及してきているのが浅層地下の未固結の砂礫層や土壌を、大口径かつ定方位・不攪乱状態で、迅速に採取し、“地層断面”を観察する方法であり、前者2つの方法を補足することが可能となることから、調査方法の新たな選択肢として着目されてきた(第1表)。

未固結堆積物の柱状試料採取方法については、既に様々な地層採取装置が考案され実用化されてきた(地盤工学会地盤調査法改訂編集委員会編, 2004)。しかし、従来の工法による地層採取作業は、サンプラーを押し込む方法やビットで掘削する方法のため、サンプラーの壁周囲に荷重によって乱れが生じることや、大口径で定方位かつ不攪乱で試料を採取することはやや困難であった。

ジオスライサーはこうした問題を克服するため、1997年に広島大学の中田 高教授(当時)らが考案し、復建調査設計(株)によって実用化・製品化された(特許第2934641)。この画期的な地層採取装置を用いると、大口

第1表 3つの調査手法毎の有意点の相互比較。

	情報量 (水平幅・方位)	深度	乱れ・欠損	調査場所・地質	試料の量	手軽さ
地層断面	○	△	○	△~×	◎	○
ボーリング	△	◎	○~△	○	○~△	○~△
トレンチ	◎	×	◎	○~△	◎	○~△



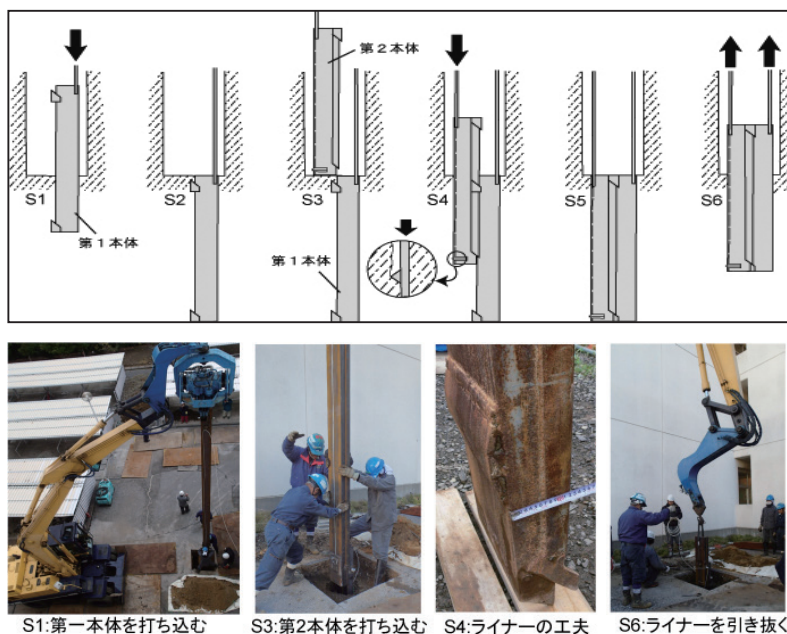
第1図 新 ACE ライナーを用いた千葉県美浜区での液状化 – 流動化調査(左)および採取された試料の一例(右)。

径、定方位かつ長尺(約 10 m 程度まで)の不攪乱試料を短時間に採取し、さらに、採取場所で回収状況を確認することができる。ジオスライサー調査工事の普及により、未固結地盤における掘削調査工事、特に活断層や津波堆積物調査に一大革命をもたらした(中田・島崎, 1997; 原口ほか, 1998)。ジオスライサーの場合、サンプルボックスとなる矢板に、ガイドクリップのついた蓋(シャッタープレート)を打ち込み、試料を回収することが、技術的なポイントとなる。

その一方で、我々は既に各方面(例えば、鎌滝ほか, 2005; 木庭, 2010; 藤原, 2013)で広く活用されてい

1) 元産総研技術研修員
2) 明治コンサルタント(株)
3) (有)ACE 試錐工業
4) 千葉県環境研究センター地質環境研究室
5) 産総研 地質情報研究部門
*) nanayama-f@aist.go.jp

キーワード: Lunch Box法, ACEライナー, 定方位・不攪乱試料, 大口径試料, 液状化-流動化調査, 津波堆積物調査, 完新世, 液状化-流動化現象, 沖積層, 人工地層, 掘削調査工事



第2図 ACEライナーの使用手順。第1本体と第2本体を地中に打ち込み、合体させた状態で同時に引き抜く。上図は、既存のボーリング孔を利用して、希望深度での試料採取を想定して描かれている。

る Lunch Box 法のコンセプト (七山・重野, 1999) を発展させてサンプラーを新たにデザインし、狙った深度の地層を確実に採取することが出来る地層採取装置、ACE ライナーを考案し、特許を取得した(特許第3669465)。そして、2004年10月に北海道厚岸郡浜中町霧多布湿原きりたつぶにおいて津波堆積物に関する公開掘削工事を実験的に行い、その成果を誌上発表した(重野ほか, 2006, 2008; Nanayama *et al.*, 2007)。この ACE ライナーを用いた調査工事の手順については、第2章に詳しく記載する。

今回、我々は地層中の液状化 - 流動化現象箇所の認定やメカニズムを解明する目的で、これまで北海道の湿原や低地の掘削調査工事で用いてきた ACE ライナー(川上ほか, 2013)を改良し、浅層地下における人工地層や人工地層以深の未固結の地層を定方位・不攪乱の状態で採取し、子細に地層の内部構造を観察できるようにした(第1図)。本稿においては、この新しい ACE ライナーによる掘削調査工事の手法およびこれを用いた液状化 - 流動化調査の概要を解説し、ACE ライナーの有効性を広く周知したいと思う。

2. ACE ライナー調査の概要と今回の改良点

2011年東日本大震災の際に、千葉県の東京湾沿岸の埋立地において、大規模な液状化災害が発生したことがよく知られている。このような大地震の振動によって発生する

液状化 - 流動化に関する基礎研究を実施するためには、乱れや欠損がなく、水平方向に幅広く、かつ深い深度までの試料観察が必要となる(風岡ほか, 1989)。しかし、液状化が生じる場所は埋立地や低地では地下水位が高く、その地質も軟弱な含水率の高い泥層、貝殻や礫を含む未固結な砂層、浚渫土砂により埋め立てられて生じた人工地層が複雑に入り交じって堆積するため、通常のトレンチ調査工事の実施は難しかった。そのため、これまで千葉県環境研究センターでは、地下水位を低下させたのちに重機によるトレンチ掘削を行う調査工事を実施してきた(風岡ほか, 1989)。しかし、東京湾岸埋立地は、人工地層の厚さが5mを超えるため、従来のトレンチでは掘削が困難であった。そこで本調査では地層中の液状化 - 流動化現象部分の認定やメカニズムを解明する目的で ACE ライナーを改良し、浅層地下における浚渫土砂により埋め立てられた人工地層を定方位・不攪乱の状態で採取し、地層の様々な構造を観察することが出来たため、その調査方法を報告する。

従来の ACE ライナーは長さ 2.5 ~ 4.5 m (掘削長により選定) の円型 (孔径 116 mm) もしくは“コ”の字形の溝形鋼 (幅 380 mm・250 mm) で構成されており、半割した部材を合体させる案内手段が設けられていることが特徴と言える。さらに三角形の突起物をサンプラー背面に取り付けることにより、第1本体と第2本体の合体を強固に固定するとともに、地中からの引き抜き抵抗の軽減を期待

することができる。この地層サンプラーにロッドを取り付けパイプロハンマーやモンケン等を使ってサンプラーを地面に打ち込み、これを回収することによって、長尺の定方位試料を採取する（重野ほか，2006，2008）。

以下に、ACE ライナーの使用について解説する（第 2 図）。

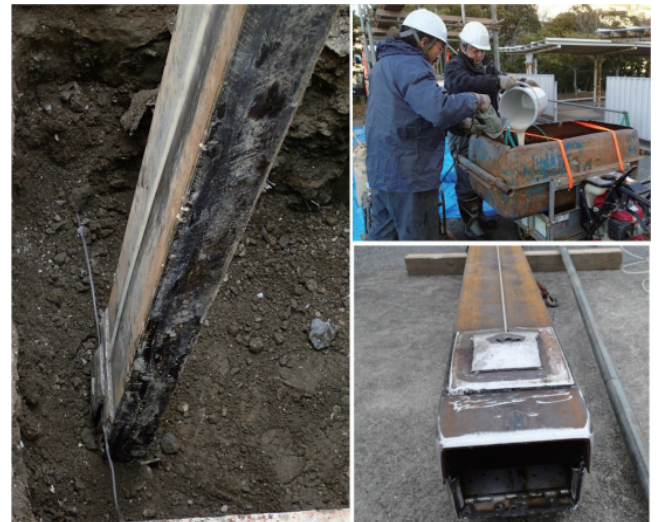
- ① ACE ライナーの第 1 本体を、パイプロハンマーやモンケン等で地面に打ち込む（S1-S2）。
- ② 次に第 2 本体を、既に打ち込んだ第 1 本体に沿って地面に打ち込む（S3）。この際に第 1 本体および第 2 本体に取り付けられた案内手段により両方のサンプラーは離れずに案内されると同時に、第 2 本体に取り付けられた突起部の作用により、第 1 本体方向へ力が作用し合体を助けるとともに、上部の土が排除されることにより地中からの引き抜き抵抗が軽減される（S4-S5）。
- ③ 案内手段により合体したサンプラーを、クレーンや油圧式ジャッキ等を用いて同時に引き抜く（S6）。

また、予めボーリング孔を掘削した後に ACE ライナーを使用することにより、目標深度の地層のみを採取することが技術的に可能となる。また、ケーシング等で孔壁を保護しつつ試料採取を繰り返し行うことにより、より深い深度までの連続試料を採取することが可能となる（第 2 図）。

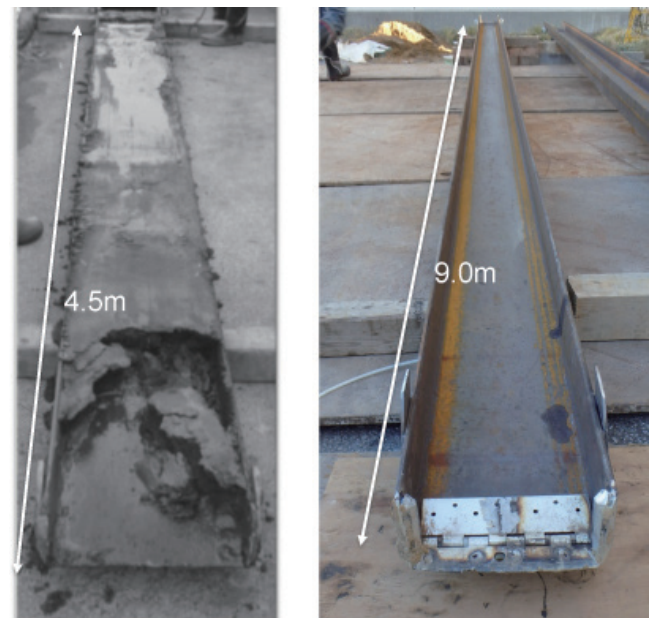
さらに、従来のシンウォールを用いた場合、サンプラーの長さは 1～1.5 m 程度に限定されていたため、一度に不攪乱状態で採取できる地層の長さに限界があり、サンプラーの継ぎ目でアーティファクト（人為的な変形）が生じることが多かった。ACE ライナーはサンプラー長を長めに設定することにより、サンプラー間の継ぎ目を減らし、この種のアーティファクトを減少させることが可能となった。

しかし、今回 ACE ライナーを用いる東京湾岸埋立地は、人工地層の厚さが 5 m を超えること、地下水位が高く軟質・硬質の地質状況変化が大きいため、従来行われていたようなトレンチ掘削も ACE ライナーを用いた調査の実施が困難であった。そこで我々は、既存の ACE ライナーのサンプラー部分を改良し、新たに幅 25 cm × 深さ 9 m × 厚さ 18 cm の改良型、新 ACE ライナーを作成するに到った。

新 ACE ライナーでは、まず、サンプラー背面に泥剤を送る泥剤供給システムを新たに設置し、サンプラーの圧入および引き抜き時の摩擦抵抗を減らそうに工夫した（第 3 図）。次に、サンプラー先端に試料の落下を防ぐストッパーを装備することにより、緩い砂を流出・落下させずに採取することが出来るようにした（第 4 図）。さらに、試料採取後のシャッター開封時にアーティファクトがしばしば生じることから、試料を固定した後、試料の引きずりを防止



第 3 図 サンプラーの背面に新たに設置された泥剤供給装置。（左）サンプラー背面から放出される泥剤、（右上）泥剤注入作業、（右下）サンプラー背面の泥剤供給装置。



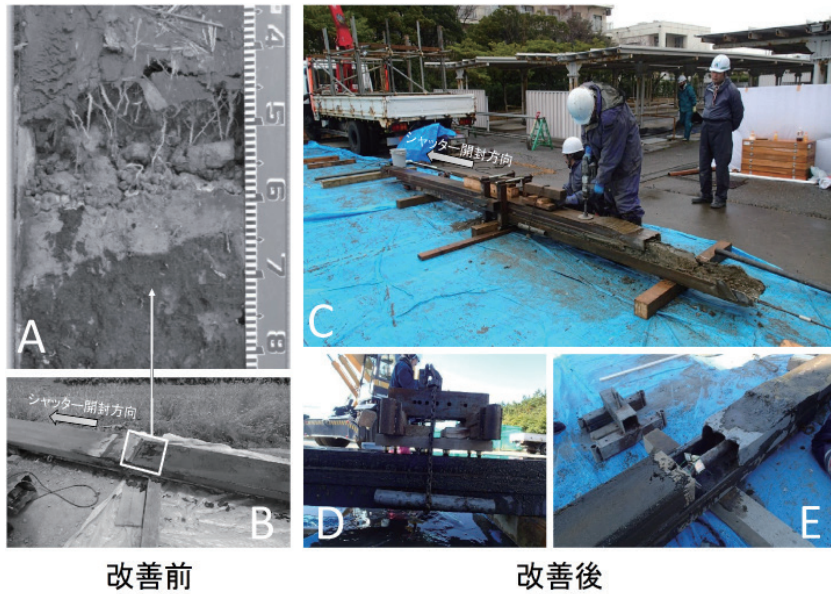
改良前

改良後

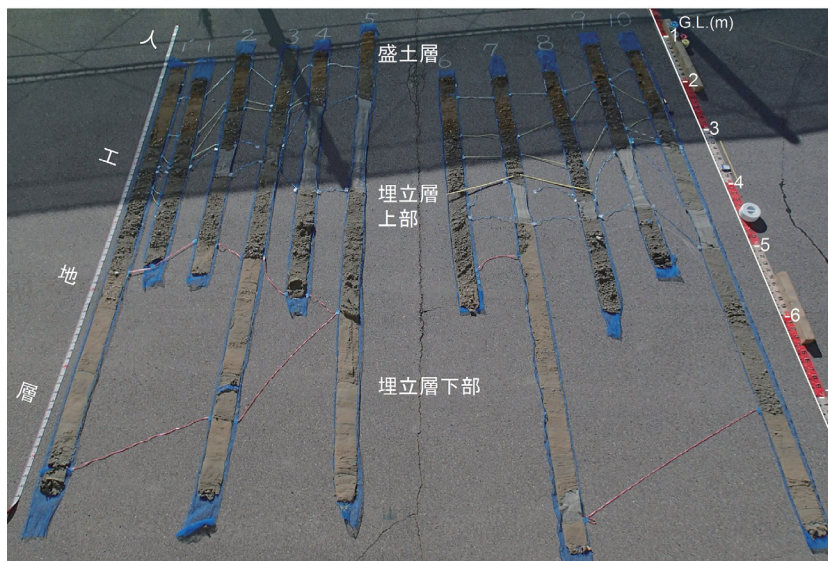
第 4 図 改良前と改良後のサンプラー先端部分の比較。サンプラーの長さを 9 m まで延長し、試料落下を防ぐためにサンプラー先端部にシャッターを設置した。

するため電動ピックで振動させながらシャッターを開封するよう作業手順の見直しを行った（第 5 図）。この結果として、乱れの少ない試料を得ることが出来るように改善された。

今回、調査箇所が学校校舎等構造物に隣接する狭所であったことから、サンプラーの圧入・引抜き時に油圧シャベルのアームの先端に取り付けられた油圧駆動のパイプロにより ACE ライナー圧入する工法（LHV 工法）を採用し、クレーン式パイプロ工法では困難な地層および狭い場所での作業を可能とした（第 1 図）。



第5図 シャッター開封時の乱れを防止する作業工程の改善前 (A, B) と改善後 (C, D, E) の比較。改善前においては、シャッター開封時に、引きずり変形が生じている (A, B)。改善後、試料の引きずりを防止するため、電動ピックを用いて振動させながらシャッターを開封するようにした (C)。さらに、シャッター開封時に第1本体と第2本体のずれを防止するためのガイドを設置し (D)、開封時に試料が移動しないよう固定した (E)。



第6図 新ACEライナーによって得られた10地点の定方位試料の層序対比。

3. 新ACEライナーによる液状化－流動化調査工事の成果の概要

2014年2月に、東京湾岸低地の千葉市美浜区の公立高校の敷地内において、新ACEライナーを用いた地層断面調査を水平方向に3～5m間隔で計10箇所実施した(第6図)。今回の掘削調査の結果、地下水位は深度約2m、人工地層の厚さは8m以上であった。地層断面観察より、地表から深度約8mまでの内部構造(ラミナの変形・消失)

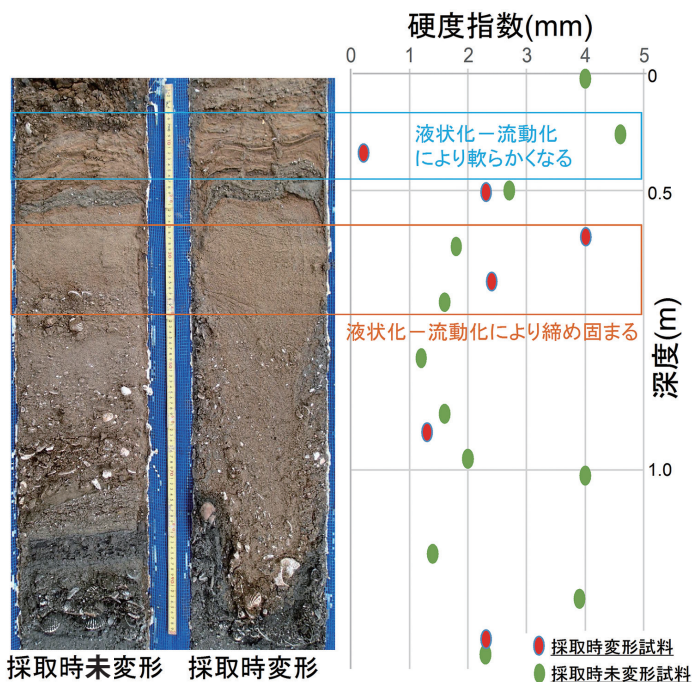
を基に液状化－流動化部分の発生部もしくは非発生部を判定(風岡ほか, 1994)した。その結果、①人工地層は地表付近の盛土層とその下位のサンドポンプ工法による埋立層から構成される。今回の地震は揺れが強く長かったため、深部までの液状化が予想されたが、液状化－流動化は人工地層全体にみられるのではなく、埋立層上部に集中してみられる。②埋立層は、主に砂層・貝殻層・泥層から構成され、地層は鉛直方向や側方へ規則的な変化(粒径が粗い部分から次第に細かい粒径へと変化していく)がみられる。

このうち、液状化 - 流動化は砂層部分の一部で見られる。③樹脂を染み込ませて採取した剥ぎ取り面によって、液状化 - 流動化部分・非液状化 - 流動化部分を判定することができ、非液状化 - 流動化部分は地層堆積時に形成されるラミナが明瞭にみえる一方で、液状化 - 流動化部分はラミナが消えたりぼやけたりし、ゆる詰まりとなっており、再液状化しやすい状態となっている。

さらに、新 ACE ライナーによる掘削時のアーティファクトの有無を確認するために、掘削時に変形（ライナー挿入時の振動による液状化 - 流動化などによる試料の乱れ）を発生させた試料とすぐ脇にて同じ深度で正常に掘削した未変形試料について、土壌硬度試験を用いて試料の硬さの比較を試みた。その結果、掘削時に変形した試料は強度のばらつきが大きく、変形によってゆる詰まりとなって柔らかくなっている部分や変形によって締め固まった部分認められた（第 7 図）。このように、掘削時に変形した部分は物性値が変わってしまうことが確認された。一方、今回掘削した試料の土壌硬度試験結果は事前に調査した簡易貫入試験結果と相関性は非常に高く、新 ACE ライナー掘削による試料の乱れや再液状化の影響は少ないと理解された。なお、新 ACE ライナーによって採取された試料を用いた研究成果については、千葉県環境研究センター地質環境研究室によって順次公表されている（風岡ほか，2014）。

4. 新 ACE ライナーを用いた地層断面調査の有効性と今後の課題

新 ACE ライナーを用いることにより、地表下 8 m までの未固結で含水率の高い粘性土や緩い砂層、比較的硬い砂混じり貝殻密集層を掘削時に再液状化させることなく、定方位不攪乱試料で採取可能であることが実証された。これは前述したジオスライサーを用いた掘削調査工事とほぼ同様に、大口径の定方位、不攪乱試料が採取できることを意味している。そして、ジオスライサーで採取された試料よりも厚みをもたせることが出来ることから、採取後も密度試験サンプリング、X 線 CT を用いた観察、土壌硬度試験（第 8 図）を併せて実施できるなど、多岐にわたる試料分析が可能となった。



第 7 図 土壌硬度計により判明した採取時の変形に伴う地層の硬さ変化。



第 8 図 採取したての試料を用いた山中式土壌硬度計による地層の硬さ測定。

ただし、今回の工事においても、試料の落下を防ぐ装置が作動せず最下部の緩い砂層が落ちることが一部で発生したことから、今後、さらなる経験の蓄積と工夫によって、試料の回収率が高くかつアーティファクトの少ない新 ACE ライナー調査工事の完成を目指して精進したいと考えている。

5. 謝辞

茨城大学の楡井 久名誉教授ならびに北海道地質調査業協会技術アドバイザーの石井正之氏には未固結堆積物の採取法につ

いて平素からご教授いただいている。また、ACE ライナー掘削調査の実施にあたっては、千葉県環境研究センター地質環境研究室ならびに千葉市美浜区の関係者にご協力いただいた。ここに記して、心より感謝する次第である。

文 献

- 藤原 誠 (2013) 膨潤性鉱物を含んだ断層岩の大型研磨試料作製. 地質技術, no. 3, 13-20.
- 地盤工学会地盤調査法改訂編集委員会編 (2004) 地盤調査の方法と解説. 地盤工学会, 889 p.
- 原口 強・島崎邦彦・小島圭二・北村精男・中田 高・松岡裕美 (1998) 地層抜き取り装置による軟弱地盤における定方位連続地層採取法. 土と基礎, 46, 24-26.
- 鎌滝孝信・西村裕一・Gelfenbaum, G.・Moore, A.・Triyono, R. (2005) 2004 年スマトラ・アンダマン地震津波調査報告: スマトラ島北西端における津波波高と堆積物の分布. 活断層・古地震研究報告, no. 5, 201-208.
- 川上源太郎・重野聖之・福間 哲 (2013) 地層引き抜きによる低地での地質調査. 第51回試錐研究会講演資料集, 61-65.
- 風岡 修・亀山 瞬・森崎正昭・重野聖之・鈴木喜之・香川 淳・吉田 剛・木村満男・酒井 豊・小倉孝之 (2014) 2011年東北地方太平洋沖地震時に発生した沈下を伴う液状化-流動化現象発生地の人工地質の特徴 - 東京湾岸埋立地千葉市磯辺地区での地質調査から - . 第24回環境地質学シンポジウム論文集, 9-14.
- 風岡 修・楠田 隆・香村一夫・楡井 久・佐藤賢司・原雄・古野邦雄・香川 淳・森崎正昭 (1994) 液状化-流動化のメカニズムとその実態. 日本地質学会第101年総会討論会講演要旨, 125-126.
- 風岡 修・楠田 隆・楡井 久・佐藤賢司・鈴木一男・Ungkap Lumban Batu・風戸孝之・香村一夫・原雄・古野邦雄 (1989) 1987年千葉県東方沖地震時に液状化した地層. 日本地質学会第96年学術大会講演要旨, 657-657.
- 木庭元晴・白澤武蔵・千葉太郎 (2010) 考古遺跡産泥質堆積物のX線像から検出された人的擾乱. 関西大学博物館紀要, no. 16, 1-9.
- 中田 高・島崎邦彦 (1997) 活断層研究のための地層抜き取り装置 (Geo-slicer). 地学雑誌, 106, 59-69.
- 七山 太・重野聖之 (1998) Lunch Box と速乾性ボンドを用いた未固結砂礫の定方位柱状試料採集法. 地質ニュース, no. 523, 52-56.
- Nanayama, F., Furukawa, R., Shigeno, K., Makino, A., Soeda, Y. and Igarashi, Y. (2007) Nine unusually large tsunami deposits from the past 4000 years at Kiritappu marsh along the southern Kuril Trench. *Sedimentary Geology*, 200, 275-294.
- 重野聖之・福間 哲・石井正之・添田雄二・古川竜太・七山 太 (2006) 新しい地層採取装置, ACE ライナー—霧多布湿原での巨大津波痕跡調査実験—. 月刊地球, 28, 568-571.
- 重野聖之・福間 哲・石井正之・七山 太・古川竜太・中川 充・伊東俊和 (2008) Lunch Box 法を応用した新しい大型定方位地層採取装置, ACE ライナーの開発. 地質ニュース, no. 652, 6-12.

SHIGENO Kiyoyuki, SUZUKI Yoshiyuki, FUKUMA Tetsu, KAZAOKA Osamu, YOSHIDA Takeshi and NANAYAMA Futoshi (2015) The improved ACE liner as a tool of large constant orientation sampling method from shallow underground: an application for liquidizing-fluidizing study.

(受付: 2015年1月9日)