

地質工學

第16輯

NGP 日本物理探鑛株式会社

季刊誌 地質工学 発刊の辞

我が日本物理探鉱株式会社は本年 12 月（1952 年）を以て創立 10 周年を迎えることになった。就いてはその記念事業の一つとして季刊誌地質工学を発刊することにした。これは我々科学技術の仕事に携わるものとしては最も相応しいことだと思ったからである。

記事の内容は物理探鉱 (Geophysical Prospecting) と土質力学 (Soil Mechanics) を主体とするが、地質工学 (Geotechnics) という土木建築に関する応用地質という立場から地下水または水文学 (Hydrology)、建造物の基礎工、隧道、堰堤の施工法等も含めたい。また応用地質学という見地からいえば勿論、温泉、鉱床地質等に関する諸問題も含んでくることになる。

兎に角本誌の内容は我々の事業の定期的な集積の里程標としたい考えであるが、一面地質工学に興味と関心を持たれる諸氏に取って有意義な存在となるであろうことを確信する。

同好の士の投稿は大いに歓迎することになっているから別項投稿規定によって活発な合流を期待する。知識と経験の交換によって斯界の進歩と発達に就いて大いなる寄与をなすであろうことを我等はここに切に念願する次第である。

1952 年 10 月

渡 邊 貫

【創刊号より転載】

Most of the problems in life are because of two reasons: We act without thinking or we keep thinking without action.

(人生の大半の問題は次の 2 つの理由によるものである。考えずに行動するか、行動せずに考えるかである。) 詠み人知らず

地質工学 第16輯

目次

- 東南アジアにおける不発弾と地雷の検知技術と現状
東北大学 東北アジア研究センター 佐藤 源之 …………… 1

- 性能設計と文化財調査のための地盤工学
防衛大学校 正垣 孝晴 …………… 12

- 岩石の風化・鉱化現象と微生物
— 琉球石灰岩と八重山砂岩の露頭調査を例として —
琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース 松原 仁 …………… 31
琉球大学大学院理工学研究科環境建設工学専攻 大城 勇人
琉球大学大学院理工学研究科環境建設工学専攻 崎山 浩考

- 平成 30 年大阪北部地震 被災状況と微地形の関係
日本物理探鉱株式会社 関西支店 金田 朋之 …………… 37
日本物理探鉱株式会社 関西支店 岩下 昂
日本物理探鉱株式会社 関西支店 塚本 泰夫

- Kaidun 角レキ岩隕石中の特異な岩片についての鉱物学的研究
日本物理探鉱株式会社 関東支店 東 浩太郎 …………… 51

- 長崎変成岩巡検
日本物理探鉱株式会社 関東支店 金城 亜祐美 …………… 62

- 琉球列島における遠地表面波によって誘発された低周波地震
Low-Frequency Earthquakes along the Ryukyu Islands Triggered by Teleseismic Earthquakes
日本物理探鉱株式会社 関東支店 金城 亜祐美 …………… 64
琉球大学地震学研究室 中村 衛

- テラザイムによるトリチウム水処理の可能性についての検討
富山大学研究推進機構水素同位体科学研究センター 赤丸 悟士 …………… 69
日本物理探鉱株式会社 内田 篤貴
日本物理探鉱株式会社 久永 哲也

東南アジアにおける不発弾と地雷の検知技術と現状

佐藤 源之

東北大学 東北アジア研究センター

1. はじめに

我が国は1999年3月1日に発効した対人地雷禁止条約（オタワ条約、正式名称「対人地雷の使用、貯蔵、生産及び移譲の禁止ならびに廃棄に関する条約」）を通じて世界の地雷廃絶に積極的に取り組んできた[1][2]。しかし地雷被災国での地雷除去活動は20年以上経過した現在でも多くの問題を抱えている。同様にクラスター爆弾の生産、貯蔵、使用、移譲を禁止するクラスター爆弾禁止条約（通称オスロ条約）は2010年8月1日に発効した[3][4]。

地雷・不発弾は紛争を経験した東南アジア、東ヨーロッパ、中近東、中南米、アフリカと世界中に分布している。地雷は日本国内に残存しないが、第2次世界大戦中に投下された爆弾は不発弾として国内にも未だに多数残されている。一方1960年代、1970年代に多くの紛争問題があった東南アジアでは、ほとんどの紛争は解決したものの、地雷、不発弾が地中に残され経済活動の大きな妨げとなっている。

東北大学では9.11同時多発テロ後のアフガニスタンでの和平構築に貢献するため開始されたJST人道的対人地雷探知・除去技術研究開発推進事業の支援を受け、2002年から地中レーダと電磁誘導センサ(EMIセンサ、金属探知機)を組み合わせた地雷検知センサーALIS(エーリス)を開発してきた[5]。本稿ではALISの技術ならびにALISを利用した人道的地雷除去活動を紹介する。またALISを利用した地雷検知・除去活動の一例をカンボジアでの活動を中心に紹介する。またラオスで行われている不発弾除去活動の状況を併せて紹介する。

2. 地雷・不発弾問題

戦場において敵の侵入を防ぐために地雷が利用される。地雷は徒歩で侵入する人間を攻撃対象とする対人地雷(Anti-Personnel Mine: AP mine)と戦車など車両を対象とする対戦車地雷(Anti-Tank Mine: AT mine)に大別される。前者は直径10cm程度であるのに対し、後者は直径30cm以上の大きさを持ち、爆破による破壊威力の規模は全く異なる。地雷は侵入者が容易に見つけられないように浅い地面に埋められる。対人地雷は人が踏みつける5kg程度の加重で爆発するように深さ5cmより浅く、また対戦車地雷は人間が足で踏んでも爆発せず、車両が誘爆するように

50cmから1m程度の深さに埋められる。1960年代以降に使用された対人地雷は、金属探知機で容易に検知されないよう、プラスチック製の地雷がほとんどであるが、対戦車地雷の多くは金属製である。

地雷は相手の侵入を防ぐために利用されるが、意図的に地雷が埋められていることを相手に知らせることで、心理的に侵入を防ぐような埋設方法をとることで、実際に埋設した数より大きな効果があげられる。地雷を埋設した場所を埋設した側は把握し、自軍が地雷原に侵入しないようにするが、対人地雷の場合、その一つずつの位置まで記録が残されることはほとんど無い。紛争終結後、地元住民は住居周辺の地雷原位置を大凡把握できるが、一つずつの地雷を見つけて取り除くことはできないから、地雷原は人が立ち入らない場所として放棄される。カンボジアは稲作を主体とする農業国であるが、地雷によって放棄された水田が経済復興の妨げとなる。

一方対戦車地雷は農民が通常生活するうえで、仮にその上を歩いても爆発する例は少ない。しかし道路に埋められた対戦車地雷が自動車の衝撃で突然爆発したり、農耕トラクターが水田や畑に残された対戦車地雷を誘爆する例は今でも少なくない。カンボジアのような内戦があった地域では、地雷に加えて追撃砲弾などが爆発しないで土中に残存する不発弾(Unexploded ordnance: UXO)が同時に存在するのが通常である。

航空機から投下され、爆発せずに地中に潜りこむ爆弾が不発弾になる。また一つの投下爆弾の内部に多数の小爆弾を抱え、投下するときに地上に小爆弾をばらまくクラスター爆弾は、小爆弾が爆発せずに地表に残り非常に多数の不発弾を生み出している。

このように地雷、不発弾と言ってもその種類は多く、これらが地表や地中に残された原因は実に多様である。各地域の歴史的な経緯を知らずに地雷・不発弾の問題に取り組むことは不可能である。紛争が終結した国々において残存する地雷や不発弾は、単に事故によって死傷者が発生するという問題に留まらず国内の自由な移動や生活に支障をきたし、多くの場合農業を中心とする経済活動に多大な影響を与えている。地雷被災国の多くは紛争からの回復をめざす発展途上国であり、他の国からの経済的、技術的支援がなければ国内の地雷・不発弾を除去することはできない。そこで

日本を初めとする国が、ODA や民間からの寄付により地雷・不発弾除去活動に取り組んできた[2].

3. 地雷検知・除去技術

地雷除去は軍事的地雷除去と人道的地雷除去に分けられ、両者の目的は大きく異なる。軍事的地雷除去の目的は、敵が敷設した地雷が存在する地雷原を、軍用車両や兵隊がいかに早く通りぬけるかにある。そのためには地雷原の位置と規模の特定が重要である。地雷原とは主として対人地雷が埋められた地域・範囲を意味し、地雷一つ一つの位置を指すものではない。一方人道的地雷除去は紛争終結後、地雷原を地元住民が土地を危険なく利用できる状態にして返還することにある。軍事的地雷除去では 100%の地雷除去は要求されないのに対し、人道的地雷除去では 100%の除去でなければ意味を持たない。従って両者に利用する技術は同じではない。例えばドローンに搭載する赤外線カメラやレーダ技術は、地雷原の特定には利用できる可能性を持つが、現状で個々の地雷を検知する能力は無いと考えている。本稿では以降、人道的地雷除去に絞った議論をする。

人道的地雷除去の手法は、国連の原則によって地雷被災国が制定する独自の規則に従うが、地雷検知、地雷除去技術は現場の状況に応じて幾つもの手法が組み合わせて利用されている。大型機械を利用して、地面を叩くことで地雷を強制的に爆破する「機械除去」技術は飛行場など無人で広域な除去に適するが、農村などでは利用しにくい。それは、大型機械を地雷除去現場に運び入れるために道路の整備から始めなければならないこと、また農村の村落中では周囲に爆発物などが飛び散る危険性があるため、使用範囲が制限されることなどによる。

地雷検知には電磁誘導型センサー (Electromagnetic Induction Sensor : EMI sensor 通称：金属探知機) を利用し、対人地雷に含まれる微小な金属を捜す手法が広く利用されてきた。大型機械除去を行った場所では、作業後に金属探知機などによる確認作業が義務づけられている。爆薬の臭いを検知する地雷犬は有力な検知手法であり、導入が進んでいるが、運用費用の高い事が最大の問題である。これを解決するため大型のラットを利用した検知技術の導入が始まっている。

現状では地雷検知技術として金属探知機が地雷検知に最も一般的に利用されているが、金属探知機は地雷以外の金属片にも反応するため、掘り出し作業に無駄な時間を要している。そこで金属探知機に埋設物の形状を認識できる地中レーダ (GPR) を併用する「デュアルセンサ」が地雷検知効率を上げる手法として期待されている。2000

年頃より我が国も含め多くのグループが GPR の地雷検知利用を試みたが地雷原の土壌では GPR の検知画像が強いクラッタを受けるため実際の利用は容易ではないことが明らかになった[6].

4. 不発弾検知・除去技術

不発弾はほぼ 100%が鉄製であり、また 30cm 以上の大きさを持つ。除去すべき不発弾の埋設深度は状況により極浅い深度から 2m 以上と大きな幅がある。地雷と異なり、起爆装置である信管に対して大きな機械的衝撃を与えない限り爆発する恐れは少ない。こうした状況から不発弾の検知には磁気センサーと電磁誘導センサーが利用される。この 2 種類のセンサーは一般的には共に「金属探知機」と呼ばれ混同されることがあるが、両者の原理は大きく異なる。

地球には地磁気が存在し、その強度と向きは数百 m 程度の範囲ではほぼ一定と考えられる。磁気センサーは磁気を高精度に計測するセンサーである。同一方向に感度を持つ 2 つの磁気センサーを一定間隔をあけて平行に配置し、2 地点での磁気の変化を検知する。この方法を差動型磁気センサーあるいはグラジオメーターと呼ぶ。周囲に強磁性体である鉄が存在すると周囲の地磁気は図-1 に示すように鉄製物体 (強磁性体) により局所的に歪められるため、差動型磁気センサーは鉄の存在を検知できる。単一のセンサーで地磁気の強度や方向を計測しても、不発弾など小さな強磁性体物質による地磁気の歪みは非常に小さく検知が難しい。しかし 2 点での地磁気の差分を計測すれば、歪み分、つまり変化のみを検知するので感度が高まる。土壌に含まれる鉄成分が熱によりキューリー温度を超えると地磁気を失い、周囲の地磁気と異なる磁気をもつ。磁気センサーはこうした磁気の変化も検知するので窠跡などの遺跡調査にも用いられている。自然界における強磁性体は鉄がほぼすべてであり、アルミや銅は磁気センサーでは検知できない。

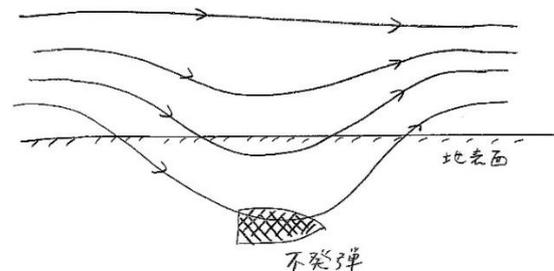
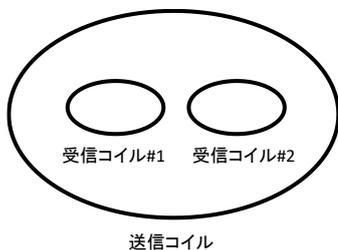


図-1 強磁性体による地磁気の変形

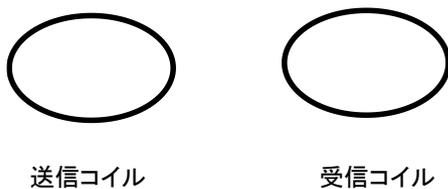
一方電磁誘導センサーは能動センサーである。まず送信コイルに交流電流を流し交流磁界 (一次

磁界)を発生させる。一次磁界は埋設物中の導電性物質の内部に渦電流を誘起し、渦電流は二次磁界を発生する。電磁誘導センサーは二次磁界による誘導起電力を受信コイルで検知する。電磁誘導センサーは導電性がある物体であれば、鉄、アルミ、銅など種類を問わず検知できる。

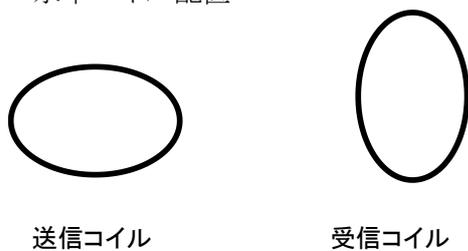
磁気センサーと電磁誘導センサーは特徴が異なるため適切に使い分けることが必要である。不発弾検知に利用する携帯型の磁気センサーは2つの磁気センサーの間隔は50cm程度であり、地下数m程度の感度を持つ。金属鉱床探査などでは数十m以上の大きさのコイルを利用した電磁誘導センサーも利用されるが、地雷検知、不発弾検知では人が歩きながら利用できる小型の電磁誘導センサーが主に利用されている。



(a) 差動型コイル配置



(b) 水平コイル配置



(c) 水平-垂直 コイル配置

図-2 電磁誘導センサーにおけるコイル配置

電磁誘導センサーに用いる送受信コイルの配置により、感度を調整することができる。対人地雷は深度30cm程度までの深さにある極微量な金属を検知する必要がある。こうした目的では送受信コイルを同一の位置に配置することで検知範囲を狭め、感度を高める。一方対戦車地雷や不発弾を検知する目的では送受信コイルを離して配置するか、大きな送受信コイルを用いることで、検知深度を2m程度まで深くする。

不発弾、地雷を検知する目的の電磁誘導センサ

ーは携帯型であるため、送受信コイルの間隔は数cmから1m程度である。このとき、埋設物中の渦電流で発生する2次磁界は、送信コイルからの1次磁界に比べて極めて微小である。このため、受信コイルが送信コイルからの1次磁界に対する感度を軽減するコイル配置が工夫される。例えば地雷検知用の電磁誘導センサーでは、図-2(a)に示すように2つの差動型の受信コイルを送信コイルに対して対象に配置することで、1次磁界を相殺する差動型センサーが利用できる。また、コイル配置を図-2(b)のように水平同士ではなく図-2(c)のように水平と垂直に配置することで1次磁界に対する2次磁界の振幅の比率を高められることも知られている。またこのとき送受信コイルの間隔を変えることで、最大感度を持つ深度を変化させられる[7]。

尚、物理探査関係では電磁探査法という言葉が使用されることがあるが、地雷検知関係では電磁誘導センサー、EMIセンサーなどの呼称が専門的に一般的であり、ほとんどの場合これらを金属探知機と呼んでいる。本稿ではこれに従い金属探知機という用語を使用する。

5. ラオスでの不発弾検知・除去

ラオスは国民一人あたりの不発弾の数が世界で一番多いことが知られている[8][9][10]。ラオスにおける不発弾問題はベトナム戦争に端を発する。1964年から1973の間に米軍がラオスに投下した爆弾の量は少なくとも2百万トンにのぼり、2億7千万個の小型爆弾がクラスター爆弾として投下されたと推定されている。ベトナム戦争時ラオスは北ベトナムが支援するベトコンへの補給路として使われたため、米軍の爆撃対象とされた。一方非公式な記録によれば南ベトナムの基地から北爆を行い帰還する米軍爆撃機が着陸前に低高度で未使用のクラスター爆弾をラオス国内の山地に投棄したため、爆発しない大量のクラスター爆弾が残されたとされている。



図-3 ボンビー (UXO Museum, ビエンチャン).



図-4 クラスター爆弾 (UXO Museum, ビエンチャン).

MAP OF UXO IMPACT AND BOMBING DATA 1965-1975

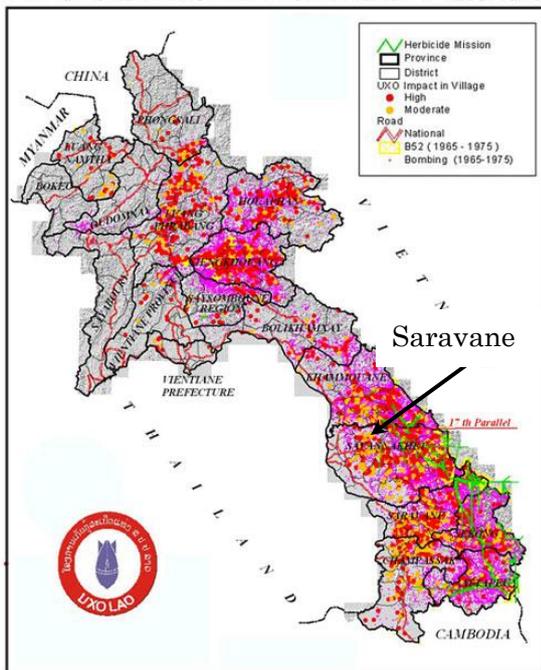


図-5 ラオスの不発弾分布図 (UXO Laos[9])

残存する UXO は国土の 35%にも及び、経済への影響は極めて大きい。

ラオスの不発弾処理が進んでいないのには、処理が進んだ場合の経済効果の低評価、そして処理する技術の不足、という 2 つの要因がある。まず経済効果については、ラオスは人口がわずか 600 万人程しかおらず、経済力もアジア最貧国の一つということで、これまで多額の資金を投じてまで同国の不発弾を処理するメリットが極めて小さいと考えられてきた。次に技術不足は、ラオスの山が多い地形とクラスター型の不発弾が多いこと等の特徴により、カンボジア等の隣国で用いられてきた技術をそのまま適用することができず、処理の技術に新たな工夫が必要となっており、同国の技術力では対応が難しい状況が続いている。

一方従来の経済効果推計はラオスの地理的な優位性が考慮されておらず、著しく過小評価されてきた。同国は中国、ベトナム、タイ、ミャンマーといった近年成長著しい大国に囲まれており、特に不発弾が集中するエリアは、人口 8000 万人を擁するベトナムと人口 6000 万人のタイを結ぶ要所に位置する。したがって、ラオスの不発弾が除去されれば、その経済効果はラオス国内の経済活動がメリットを受けるだけにとどまらない。その結果は、ベトナムとタイを陸路で結ぶ要所が整備されることによる相乗効果を生み、交易拠点としてラオスの価値を一層高めるのみならず、ベトナムおよびタイに多額の投資を行っている日本企業を含めた周辺への波及効果も極めて大きいと考えられる。

ラオスにおける不発弾処理は National Regulatory Authority for UXO/ Mine Action in the Lao PDF (NRA)によって計画され、実際の不発弾検知、処理作業は、国家組織である UXO Lao や MAG, JMAS のような NGO 団体が実施している。政府機関が国家全体の活動を計画し、複数の団体が現地での除去活動に携わる形態は多くの不発弾、地雷被災国に共通している。

また不発弾除去作業には、日本を含む多くの国が協力している。日本は 2015 年から 2018 年にかけて UXO Lao に対して「不発弾除去組織における管理能力強化プロジェクト」として JICA が技術協力プロジェクトを実施した。また日米が協力した活動も計画されている[11][12]。

例えば我が国は「南南協力」[9][13]として、これまで技術支援を行ってきたカンボジア地雷除去対策センターCambodian Mine Action Center (CMAC) が培ってきた地雷、不発弾の検知・除去技術をラオス[10]など他の国に対して供与する仕組みを作り始めている。

ラオス政府は UNDP, UNICEF などの国連機関の支援を受けながら Lao National Unexploded Ordnance Programme (UXO Lao) を 1996 年に創設した。UXO Lao は首都ビエンチャンに本部を置き、不発弾の多い国内 9 つの州 (Huaphanh, Luangprabang, Xiengkhuang, Khammuane, Savannakhet, Salavan, Sekong, Champasak and Attapeu)で活動している。またこれらの各州に拠点を設置し、地元自治政府と協力した活動をしている。現在 1060 名が活動している。UXO Lao は農地、水路や学校、病院、寺院など農村の拠点において不発弾除去を行っている。

著者は 2017 年 9 月に、サラワン(SARAVANE) 県における UXO Lao の活動を見学する機会を得た。サラワン(SARAVANE) 県はラオスの南部に位置し、ラオスとベトナムの国境へは 70km 程度

の距離である。この地域は特にベトナム戦争当時、北爆から帰還する米軍爆撃機が低高度で使用しなかった爆弾を投棄したため多数の不発弾として遺棄されたとされている。今回はサラワン(SARAVANE)県において2箇所の不発弾除去サイトを見学した。

以下に、標準的な不発弾検知作業の手順を示す。



図-6 サラワン県で典型的なボンビー



図-7 金属探知機校正用の標的物と校正に利用する孔

本地域に残存する多くの不発弾は図3に示すクラスター爆弾に内蔵される直径10cmほどのボール状の爆弾、通称「ボンビー」である。鉄製のボンビーは図4に示すクラスター爆弾に多数内蔵され、地表では広域に拡散する。このうちの多くが爆発せずに不発弾として残される。投下後20年以上経過する過程でボンビーは雨と共に土の中を移動する。

不発弾除去作業に先立ち、金属探知機の感度校正を、専用に準備したサイトで行う。校正用サイトには、「ボンビー」の外殻の半分を深さ10cm程度の穴に埋めている。見学した時点で穴には雨水が溜まっており、センサーへの感度の影響がやや懸念された。

サイト-1 (密林)

この場所は平坦であるが、完全に樹木に覆われている。周囲はコーヒー畑であり集落にも近い。従って、大型機械により地雷を踏みつぶして除去する機械除去作業は行えない。



図-8 金属探知機の操作員。UXOLaoの規則により、付近に人がいる場合、検知作業は停止しなければならない。

このサイトではVallon社製VMXC1-3が使用されていた。密林状態であるため、GNSSによる測距は行えない。UXOLaoでは1m以上の深い深度と1m以下の浅い深度で金属探知機を2種類使い分けている。適切なセンサーを利用すれば、これは1種類のセンサーで済むように思われる。例えばMIL/D1/DSでは、センサポールの長さを調節することで、センサーの深度に対する感度を調節することが可能である。またGNSSの併用は検知精度と信頼性の向上につながる。

不発弾の除去は掘削作業(プロディング)によって行う。プロディングに先立ち、金属探知機で埋設物を検知した場所から15cm離れた位置に標識用の木の棒を置く。この作業は、筆者が通常携わる対人地雷の除去作業手順と非常に異なる。対人地雷は地雷に加わる荷重で爆発するため、地雷位置を1cm精度で正確に特定してからプロディング作業を始める。通常不発弾はプロディング作業や、地表からの荷重で爆発することは無い。場所の精度は対人地雷用のようには要求されない。



図-9 発見された不発弾



図-10 プロットディング作業

サイトー2 (平坦地)

このサイトは広く平らな場所であるため草刈り機 (brush cutter) が有効に利用できる。草刈り機を使った不発弾除去の手順は以下の通りである。



図-12 大型機械による刈り払い作業

- (1) 金属探知機でランダムにエリア内を探知し、明確な金属反応がある場所に印を置く。この場所に草刈り機はかけない。
- (2) 草刈り機によって深さ 5cm までの表土を削り、埋設物を除去する。
- (3) 草刈り機の操作から2時間経過してから金属探知機での探知を開始する。これは草刈り機の作業によって対人地雷、不発弾などが誘爆することを避けるためである。
- (4) 金属探知機による不発弾検知作業は、25mx25m の区画を1単位とし、1m の刈り幅で探知を行う。

訓練施設

現場の見学の後、首都ビエンチャンに整備を進める UXOLao の訓練施設を訪問した。この施設の主な目的は不発弾の切断処理であり、日本の援助によって整備が進められている[14]。施設には金属探知機の訓練サイトも準備される予定であるが、訪問時には整備の途中であった。



図-11 EMI センサーによる金属探査作業



図-13 UXOLao 訓練施設 (ビエンチャン)



図-14 深部探査用金属探知機(Ebinger Type 740M)

6. 金属探知機の画像化

不発弾検知に利用される金属探知機は、小さな金属片が埋設されていた場合にも、1m 程度の空間的な反応の広がりを持つ。これをセンサーの点対象物に対する反応（空間的インパルス応答）とすると、実際の埋設物探知では、埋設物の実際の形状と金属探知機の空間的インパルス応答の空間的なたたみ込み積分として応答信号が得られる。通常は高精度の位置情報を必要としないので、金属探知機は信号出力を音声出力として強度分布のみ利用する。

我々は金属探知機の信号を位置情報と同時取得し画像化する試みを続けてきた[15][16]。図-15は埋設した鉄パイプを地表面を観察するカメラ画像の相対的な動きからセンサー位置を推定し、金属探知機の出力信号を画像化した例である。対象物の形状が明瞭に判別できている。

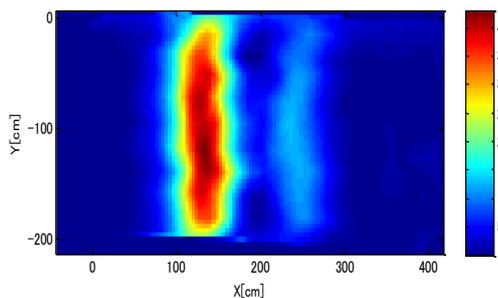


図-15 金属探知機で画像化した金属製パイプ (CEIA MIL-D1/DS)

図-17 はカンボジア・コンボン チュナンにある CMCA(Cambodian Mine Action Centre)の不発弾検知訓練所で我々が開発した可視化金属探知機の評価を行った様子である[17]。本装置は、金属探知機(CEIA MIL-D1/DS)にプリズムを装着し、トータルステーションで位置追跡を行い、その情報を元に金属探知機の出力を画像化したのが図 17 である。2次元平面図から埋設不発弾のお

およその方向まで推定できる。画像化された金属探知機信号に対して、金属探知機の空間的インパルス応答を利用したデコンボリューションを施せばより画像の鮮明化が図れる。また 3 次元的な電磁誘導計測を行う事で、不発弾を磁気ダイポールで近似し、ダイポールの方向を 3 次元的に推定する手法なども研究されている。これは信管の位置の推定につながることから不発弾処理事業の安全化につながる。



図-16 CMCA の不発弾検知訓練所での金属探知機による画像化実験

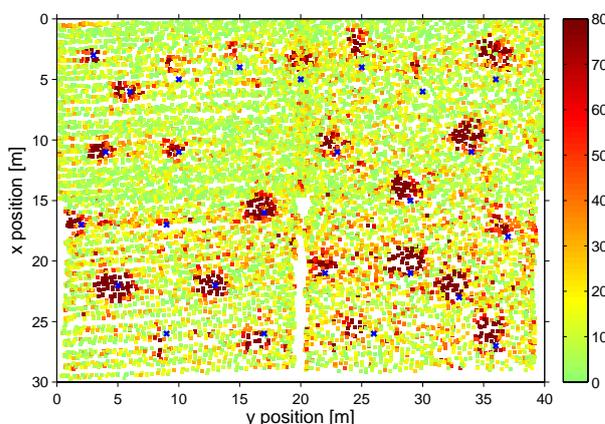


図-17 画像化した不発弾[17]

7. ALIS による人道的地雷除去

対人地雷を主な対象とする人道的地雷除去ではこれまで主として電磁誘導センサ（金属探知機）が検知センサーとして利用されてきた。金属探知機は検知能力に関して非常に信頼性が高い半面、地雷に含まれる金属以外にも反応するため、掘削除去作業（プロッディング）に膨大な時間がかかることが最大の問題である。この問題を解決する手段として金属探知機に地中レーダ(GPR)を組み合わせた「デュアルセンサ」の開発が 2000 年頃より進められた。現在米国製 HSTAMIDS、英国製 MINEHUODS などのデュアルセンサが知ら

れており、軍隊による地雷除去活動の他、一部人道的地雷除去に NPO などが利用している。

東北大学は 2002 年より、デュアルセンサ ALIS の開発を開始した。東北大学が開発するデュアルセンサ ALIS の最大の特長は GPR 信号を合成開口レーダ処理 (SAR, マイグレーション) により埋設物の画像化を行うことでクラッタの軽減を図る点にある[18]-[25]。操作者は ALIS の金属探知機を利用して地中の金属を検知したら ALIS の GPR 機能を利用し SAR 処理後の画像信号から地雷の有無を判断する。ハンドヘルド型センサーで SAR 処理機能をもつ GPR センサーは世界で ALIS のみである。

ALIS の SAR 処理を可能にするのは、人間がセンサーヘッドを自由に走査してデータを取得するハンドヘルドセンサーでありながら、センサー位置を追跡できるシステムを具備することにある。プロトタイプ ALIS ではセンサーに取り付けたカメラで地表面画像を撮影し移動位置を推定した。2017 年に完成した新型 ALIS では 3 軸加速度計情報からセンサー位置を追跡している。

ALIS で使用する SAR 処理では走査を行う 50cm 四方の範囲で 2cm 程度の位置精度が必要である。GNSS などですべての情報を取得することは難しく、また地雷除去作業は GNSS を利用できないジャングルなどでも実施されている。

8. カンボジアにおける人道的地雷除去活動の展開

我々は ALIS プロトタイプを利用してクロアチア、カンボジアの実地雷原で地雷除去を実践してきた。2009 年 7 月からカンボジア地雷除去センター CMAC が ALIS を用いて行った評価試験で検知された埋設物は 15,621 個である。2 台の ALIS を利用し総計 254,867 m² の範囲で地雷除去を実施した。この中で総計 78 個の対人地雷が ALIS によって検知され、そのほとんどが旧ソビエト製対人地雷 PMN-2 であった。

ALIS で取得したデータはそのすべてが PC に保存されている。実地雷原で取得したレーダデータが保存されている例は世界的にも ALIS 以外に無い。また CMAC 隊員は、すべての金属片を掘り出す作業を行うが、すべての地雷を含む金属片以外の埋設物体を記録し、写真を撮っている。また作業員が ALIS のデータを見て、地雷の可能性の有無の判断を記録している。こうしたデータは今後の ALIS 開発に活用されている。

総計 15,621 個の金属反応の中で 3,522 個は実際には金属片であるのに地雷として作業員によって報告されている。また 12,081 個は金属片を ALIS によって正しく金属片として識別し、82 個の地雷はすべて正しく地雷として識別された。こ

の識別率の高さがデュアルセンサが金属探知機より作業効率を高めることができる証である。

実地雷原で長期間にわたり実証試験を重ねてきた ALIS ソフトウェアを搭載する新型 ALIS が 2017 年末に完成した。図 19 に概観を示すとおり、その形状や、重量が 3kg しかないことなど従来の金属探知機と変わりがなく、現場への導入が容易である。信号処理は Android を搭載したタブレット PC で行うため高い処理能力を備えており、4.7 インチのカラー液晶表示により操作者は屋外でも容易にレーダ画像の確認ができる。

新規開発された ALIS は、2018 年 2 月にカンボジア地雷除去センター (CMAC) の協力を得て、CMAC テストサイトで評価試験を実施した。本サイトにはカンボジアの典型的な土壌が数種類用意されている。またサイトに埋設されている地雷は爆薬を残したまま起爆装置を外した不活性地雷 (Inert Mine) 地雷である。GPR は地雷の構造によって反射信号が大きく変わるため、不活性地雷を利用した評価試験の意義は大きい。ちなみに本サイトは 2006 に実施した JST プロジェクトで日本の援助によって整備された施設である。

現在東北大学では 2 台の ALIS を CMAC に貸与している。このうちの 1 台は愛媛県松山市に本拠を置く認定 NPO 法人国際地雷処理・地域復興支援の会 (IMCCD) が運営するチームによって運用されている。



図-18 草刈り作業

ALIS は CMAC による評価試験を経て、2019 年 1 月よりカンボジア国内の実地雷原での利用が認められた。2019 年 1 月、カンボジア西北部に位置するバタンバン県において、IMCCD による ALIS を用いた地雷除去活動を訪問した。地雷除去作業に先立ち、草刈りが行われる。地雷除去を行う地域の多くは水田、あるいは農耕地であった場所であるが、内戦終結後、地域住民は地雷原の位置を知っているので立ち入ること無く放棄されている。そのため、カンボジアにおける地雷原

は多くの場合、草や灌木で覆われている。地雷除去対象地が広く平坦である場合にはラオスの不発弾処理で紹介した大型の草刈り機を利用した刈り払いも行われるが、農耕地や集落に隣接した小規模な場所では機械除去は利用されていない。

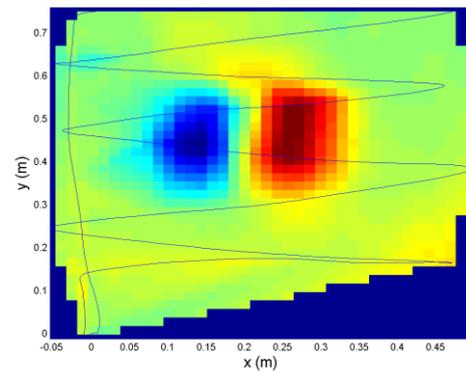
まず、検知を行う範囲を 1.5m 幅に設定し、安全地帯に赤い木の棒で印を置く。草刈りを終えた後、これまで検知には金属探知機を利用してきたが、新たに ALIS を利用した検知が行われている。ALIS で赤い木の棒から先方 50cm の範囲で金属反応の有無を確認する。金属反応がなければ、50cm の区間は安全と見なし、木の棒を 50cm 先に置き直す。もし金属反応があった場合は、ALIS の GPR モードで GPR データを取得する。1 回のデータ取得はおおよそ 50cmx50cm の範囲で行うが 1 分以内で終了する。データ取得が終わるとほぼ瞬時にデータは信号処理され、図 20 のような画像がセンサー画面に表示される。



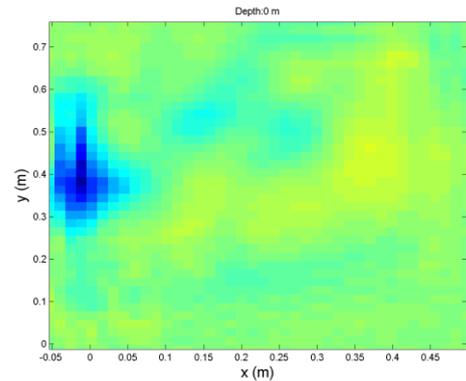
図-19 ALIS による地雷検知

操作員は ALIS の画面をスマートフォンと同様に指で操作し、GPR 画像に地雷の有無を確認する。もし地雷と判断した場合には金属反応の位置に赤いプラスチックタグを置き、地雷で無いと判断した場合、青いタグを置く。将来的には青いタグに関しては簡易な掘削によって埋設物を取り出すことを考えているが、現状では CMAC の規則によって金属反応があった場所を掘削（プロッディング）で確認する。

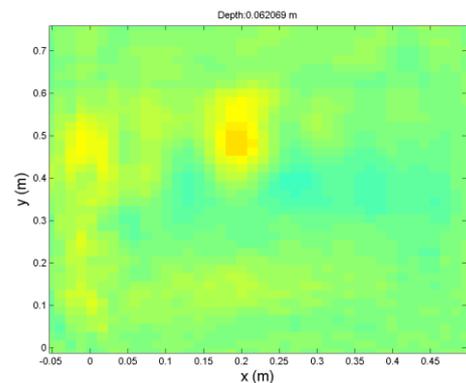
図 20 の ALIS の表示画面では 50cmx50cm 程度の操作者が動かずにセンサヘッドを走査できる範囲が示されている。図 20(a)は金属探知機の実データである。金属探知機は差動型で、赤と青の正負の信号の中心に金属が存在する。GPR データは水平方向、深度方向の 3 次元データである。図 20(b)-(d)には、深度毎の GPR 水平スライスが示されている。図 20(a)で判定できる金属の位置に明確に地雷の形状が確認できる。操作者はこのデータを確認して、地雷の有無を判断する。



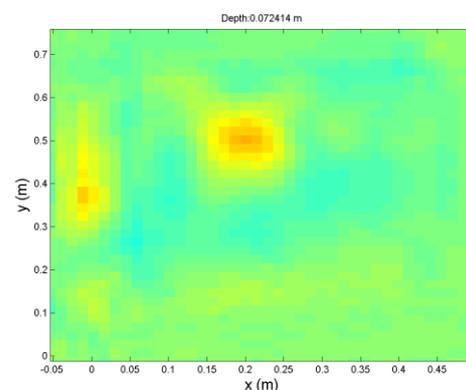
(a) EMI signal



(b) GPR (0cm depth)



(c) GPR (6.2cm depth)



(d) GPR (7.2cm depth)

図-20 ALIS の画像 CMAC test site

我々は更に自動的に地雷の有無を判断できる自動処理ソフトウェアを開発しているが、人道的地雷除去では、地雷検知除去を行った捜査員が地雷原に足を踏み込むことで住民は地雷除去活動の信頼性を確かめることができる。完全自動化された信号処理は地雷除去に携わる操作員からの信頼も得ることが難しいと考えている。

対人地雷は 5kg 程度の荷重が地雷本体上部の機械的なスイッチに加わることで爆発する。これを避けるため操作員は、地雷の側面を露出させるために金属反応の位置から 15cm 程度離れた場所から掘り込む。従って、人道的地雷除去においては金属反応の位置を 1cm 程度の精度で特定しなければ作業の安全性が確保できない。

プロディングの作業は非常に慎重に進めるため、1つの埋設物を掘り出すために 10 分以上の作業時間を要することもある。ALIS が埋設金属片が地雷かそうでないかを判断できれば、プロディング作業は大幅な時間短縮が期待でき、地雷除去作業の効率化が見込まれる。



図-21 プロディング作業

我々はカンボジアで取得した実データを用い、より実的な信号処理手法の開発を続けている。

9. まとめ

本稿では、不発弾検知、地雷検知を例に、具体的な検知手法とその動向について説明した。またラオスにおける不発弾検知・除去ならびにカンボジアにおける地雷並びに不発弾の検知・除去の実情を紹介した。ラオスおよびカンボジアは我が国が長期的に地雷、不発弾の除去に技術的、経済的支援を行ってきた国である。

我が国においても沖縄を始め、全国至る所で第2次世界大戦中の不発弾は発見されることがある。こうした問題に限らず、金属探知機による埋設物検知は災害、減災にも役立つ技術であると考えている。

2018年3月にクロアチアで開催された地雷除去シンポジウムでALISのデモンストレーションを行い、地雷被災国の担当者に関心を集めた。カンボジアにおいては、2018年より本格的な地雷原でのALISの運用を開始したが、他の地雷被災国でも政府ODAとしてALISを導入することを私たちの最終目標としている。更に現在金属を含まない地雷が多数使用されているコロンビアでの導入に向け、関係者と協議を進めている。

謝辞

本研究はJSPS科学研究費補助金基盤研究(A)26249058による。またラオスの現地視察に関してはJICA林明仁専門家にお世話いただいた。またJSPS二国間交流事業 オープンパートナーシップ共同研究「ラオスの不発弾処理の経済波及効果と処理技術の開発に関する研究」代表：角谷快彦(広島大学)の支援を受けた。

参考文献

- [1] <http://www.the-monitor.org/en-gb/reports/2017/landmine-monitor-2017.aspx>
- [2] 小向 絵理 平和構築に向けた絆 国際ジャーナル社 2015
- [3] 清水俊弘 クラスタ爆弾なんてもういらぬ 合同出版 2008
- [4] <http://www.jcbl-ngo.org/database/clustermunitions/cm/>
- [5] <http://www.jst.go.jp/kisoken/jirai/index.html>
- [6] Motoyuki Sato, Dual sensor technology of landmine clearance and its applications to survey in natural disaster, Defense and Security Symposium, 2017
- [7] Wait, J.R, 1951 The magnetic dipole over the horizontally stratified earth: Canadian Journal of Physics, 29, 577-592.
- [8] MAG <https://www.maginternational.org/what-we-do/where-we-work/mag-in-laos/>
- [9] UXO Lao <https://www.uxolao.org/index.php/en>
- [10] JICA Laos <http://gweb.jica.go.jp/km/ProjectView.nsf/VWAEPrint/A2CF7D69610293B549257E1E0079E7C1>
- [11] Obama visit Laos <https://www.reuters.com/article/us-laos-obama-uxo/us-gives-laos-extra-90-million-to-help-clear-unexploded-ordnance-idUSKCN11COGV>
- [12] US-JAPAN (http://www.mofa.go.jp/press/release/press4e_000561.html)
- [13] South-South Cooperation <http://gweb.jica.go.jp/km/ProjectView.nsf/VWAEPrint/62F7A6BE196CC6A449257A160079F5B4>
- [14] UXO Laos Training Centre <https://laotiantimes.com/2016/11/14/japan-funds-upgrade-uxo-training-centre/>
- [15] Sato, M., "Dual sensor technology of landmine clearance and its applications to survey in natural disaster," Proceedings Volume 10182, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXII; 101820Y (2017); doi: 10.1117/12.2262036, SPIE Defense + Security, (2017).

- [16] 佐藤 源之 RTK-GPS と電磁法を組み合わせた栗駒山における車両捜索 物理探査学会第 123 回(平成 22 年度秋季)学術講演会 2010
- [17] Takahashi, K. and M. Sato, "Detection and mapping of UXOs by electromagnetic induction sensor and self-tracking total station," FAST Times, 19(3),14-18, (2014)
- [18] Sato, M. (2010) : Evaluation test of ALIS in Cambodia for humanitarian demining," Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7664 .
- [19] Feng, X., Fujiwara, J., Zhou, Z., Kobayashi, T. and Sato, M. (2005): Imaging algorithm of a Hand-held GPR MD sensor (ALIS), Proc. SPIE 5794, 1192-1199.
- [20] Sato, M., Fujiwara, J., Feng, X., Zhou, Z. and Kobayashi, T. (2005): Development of a hand-held GPR MD sensor system (ALIS)," Proc. SPIE .5794, 1000-1007.
- [21] Sato, M. (2005) :Dual Sensor ALIS Evaluation Test in Afghanistan, "IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter, 22-27.
- [22] Sato, M. (2009) :ALIS evaluation tests in Croatia, Proc. SPIE. 7303, 73031B-1-73031B-12.
- [23] Sato, M., Fujiwara, J. and Takahashi, K. (2007) :The Development of the Hand Held Dual Sensor ALIS," Proc. SPIE, 6553, 65531C-1-65531C-10.
- [24] Sato, M. and Takahashi, K. (2007) : The Evaluation Test of Hand Held Sensor ALIS in Croatia and Cambodia, Proc. SPIE, 6553, 65531D-1-65531D-9.
- [25] Sato, M. and Takahashi, K. (2007) : Development of the hand held dual sensor ALIS and its evaluation," Proc. 4th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. Pp.3-7.
- [26] Sato, M. "Evaluation test of ALIS in Cambodia for humanitarian demining," Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7664 · April (2010)
- [27] Sato, M. , Kikuta, K. and Chernyak, I (2018): Dual Sensor "ALIS " for Humanitarian Demining, Mine Action 2018, Croatia.

性能設計と文化財調査のための地盤工学

正垣 孝晴
防衛大学校

1. 起稿の背景

地盤構造物の設計に関する地盤調査・試験・設計法は、世界的に大きな転換期にある。1995年1月に発足したWTO (World Trade Organization; 世界貿易機構) のTBT (Technical Barriers to Trade; 貿易の技術的障壁) に関する協定やISO (International Organization for Standardization; 国際標準化機構) の規格整備に伴い、従来の仕様規定から性能規定への移行が急速に進展している。

性能規定に基づく設計(性能設計)は、必要な性能を満足することを目指す設計法である。一方、指定された基準を満足することを目指す従来の仕様規定の設計法は、構造物が必要とする性能を満足することの確認が困難であった。性能規定は、仕様規定に内在する規格・基準の欠点を克服し、新技術の導入、事業完成までの期間の短縮、地域間の規格の共通化などを通して、市場の開放性を高め、自由競争原理の機能と、高いコストパフォーマンスが市場において得られることを最終的な狙いとしている。このような地盤調査・試験・設計法の性能規定化への世界的な潮流の中で、理論と実践の両面から、[1]省力化・低コスト化に直結する高精度の地盤調査・試験技術や評価技術、[2]設計外力の不確実性や地盤の不均質性を考慮した安全で経済的・合理的設計法や維持・管理のための性能照査法の開発とそれらの体系化が喫緊の課題である。

これらの課題への対処法の一つに地盤調査・試験法の小型・高精度化技術¹⁾がある。試料採取法と室内試験法の小型・高精度化技術を軟弱地盤上の盛土設計に適用すると、従来法に比べて、費用、工期、CO₂排出量が、それぞれ26%, 6%, 35%低下する試算結果²⁾がある。地盤調査技術の選択や評価も、地盤構造物の設計・建設・供用期間の維持管理のライフサイクルの中での判断が必要であるが、環境負荷物質の排出量の削減効果も近年の大きな社会的関心事として、地盤工学の当事者として無視できない。

地盤工学分野の各種性能規定化に向けて、新しく開発された地盤調査・試験法や技術の評価法等が政策化によって身軽に採用出来る仕組みの構築も喫緊の課題である。このような仕組みがない

と、新技術の開発や研究意欲が喚起され難いからである。このような仕組みの構築の中で、地盤工学の実力が付けば、風水害・地震災害調査や地盤に係わる訴訟問題等の解決の中心的な役回りが演じ切れるであろう。建築紛争事件の8%程度は地盤工学に係わっており、この割合は増加している³⁾。また、地盤工学の専門技術とは異なる次元で、訴訟に対する解決が図られることが多い³⁾のも現実である。これらの分野で地盤工学が十分な市民権を持ち得ていないことの現われでもある。勿論、材料やその挙動が複雑で現象の特定が困難であることに加え、現象説明の精度が低いことも起因している。正確で役に立つ地盤工学が求められている。判決は法律に従って動議されることを考えると、学会規準や地盤工学技術を法律に組み込み(法制化)地盤工学の地位向上に関する施策も今後の大きな課題であろう。

著者が取組んだ研究は、円板引抜き試験法に加え、供試体の小型化・試験機の小型化と、これら小型化によって初めて実現可能な高性能サンプラーの開発と設計への適用を軸に、地盤設計のリスクの低減を目指した一連の研究であり、その内容は以下の(i)から(v)に要約できる。

- (i) 地中に埋設した小型円板の引抜き抵抗力から、粘着力を精度良く求める原位置試験法を提案している。現地の粘性土に水砕を混合して高盛土の施工管理試験への適用性を示した。
- (ii) 小型供試体を用いる小型高性能の、一・三軸、圧密、一面せん断試験機を新たに開発し、直径 $d15\text{mm}$ 、高さ $h35\text{mm}$ (一・三軸試験) と $d30\text{mm}$ 、 $h10\text{mm}$ (一面せん断、圧密試験) の小型供試体を用いても、自然土の各種試験や応力条件下の強度・圧密特性が、通常寸法の供試体と同様に適正に評価できることを示した。これらは、通常のチューブサンプラーで得た $d75\text{mm}$ 、 $h100\text{mm}$ の自然堆積土の試料片を用いて、応力条件、ひずみ速度、異方性、圧縮・伸張条件下の自然堆積土の強度・圧密特性の試験から確認している。
- (iii) サクション測定の一軸圧縮試験から原位置の非排水強度の推定法を提案し、また圧密試験で得た体積ひずみから原位置の圧密パラメータの推定法を示した。もともと応力解放や土の

乱れが強度・圧密特性・設計結果に及ぼす影響は極めて大きい、 K_0 圧密三軸非排水圧縮試験の結果から両推定法の妥当性を K_0 圧密時の K_0 の挙動と盛土の破壊事例がよく説明できることから、確認している。また、チューブサンプラーで採取した試料の密度変化を考慮した砂の原位置動的強度・変形特性の推定法を提案して、凍結サンプリングした試料の結果を踏まえて、自然堆積の新潟砂地盤や第三海堡埋立て砂への適用性を示した。

(iv) チューブ内径 45mm の小径倍圧型水圧ピストンサンプラー (45-mm) に加え、コーン貫入試験の機構を併せ持つ小径倍圧型のコーンサンプラーを開発した。これらのサンプラーは、貫入力と貫入速度が大きいことが特徴であり、一軸圧縮強さ q_u が 600 kN/m² 程度までの沖・洪積・第三紀粘性土、有機質土や N 値が 54 程度までの新潟砂も高品質で採取できる。また、これらサンプラーは、地盤工学会基準 JGS-1221,1222,1223 で規定された従来型の単管、二・三重管の 3 つのサンプラーの対象土を 1 つのサンプラーで採取できるものであり、標準貫入試験用の 66mm 径のケーシングパイプ内で試料採取でき、サンプリング時間が短く費用も安価である。一方、コーンサンプラーは、ボーリング孔の削孔が不要で、無線によるコーン情報に加え、硬質土に対する高品質の試料も採取できる。しかもこれらの倍圧サンプラーは、水圧式であるので採取試料の品質にオペレータの技術力は依存しない。

(v) 上記(i)～(iv)の成果を用いて、日本、釜山粘土、ピサ粘土、関東ロームで築造された既設アースダム堤体、世界遺産である三重津海軍所の粘性土の強度・圧密特性を体系的に明らかにした。すなわち釜山では、精緻な強度・圧密特性の提示に加え港湾部で観測された過大な沈下量が、採取試料の乱れに起因して予測沈下量を過少に評価した結果であることを示した。またピサでは、同じく詳細な強度・圧密特性に加え高品質を維持したままで、試料採取から室内試験までを従来の半分の時間で済ませられることを示した。そして、非排水強度異方性を考慮した斜面安定解析法を提案し、これら倍圧サンプラーで得た試料から推定した原位置非排水強度と非排水強度異方性が盛土の変状を良く説明することに基づき、盛土設計の信頼性評価と消費者危険を含む最適化手法を提案し、既設アースダム堤体の耐震性能評価も同様に扱えることを示した。このような精緻化技術と最適化手法は、安全で経済的・合理的な地盤

構造物設計に寄与しつつ、同時に地盤調査・試験法の省力化・低コスト化を実現する。

これらの方法や成果は、拙書⁴⁾に詳述している。また、世界遺産に登録されている重要文化財の地盤工学的調査にも採用され⁵⁾、文化財行政の意識にも変化を与えている。

本稿は、仕様規定から性能規定の流れを概観して、地盤調査・設計の現状と土木構造物の性能評価例を示し、最終(6)章では、著者による性能照査法を文化財調査に用いた一例として、世界遺産登録されている三重津海軍所遺構の地盤工学的分析の結果を示す。

2. 仕様規定から性能規定へ

公益社団法人地盤工学会は、ISO2394 の内容を踏まえ、包括的な基礎設計コードとして、2006年に「性能設計概念に基づいた基礎構造物等の設計原則 (JGS 4001-2004)」⁶⁾を基準として制定している。JGS 4001-2004 は、日本国内で土木及び建築構造物の構造的な性能を維持するため、性能設計概念に基づいてこれらの構造物を設計するときや設計コードを制定するときの原則を示している。この原則の位置づけと照査アプローチ A と B は、図-1⁶⁾に示される。

JGS 4001-2004 で採用された要求性能の記述の階層は、図-1 に示すように目的、要求性能、性能規定の 3 つである。

- ・ 構造物の目的とそれに応じた要求性能は、当該構造物建設の事業主体や所有者によって決定される。また、公共福祉の観点から、構造物の構造的な性能を総括する行政機関が、構造物が最低限満足すべき性能を規制するための要求性能を指定する。
- ・ 構造物の目的から誘導された要求性能は、構造物の照査に用いることの出来る性能規定に翻訳される必要がある。

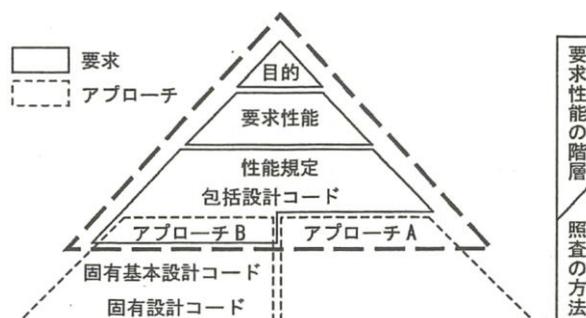


図-1 性能記述の階層性、本設計原則の位置付けと照査アプローチ A と B⁶⁾

- 性能規定の照査方法は、照査アプローチ A と B の 2 つの方法がある。前述したように 1995 年の WTO/TBT 協定以来の工業製品の性能規定型仕様により、設計の自由度を高める動きと、ISO や Eurocodes (ユーロコード) のように設計基準の標準化と統一化を進める動きがある。この 2 つの照査アプローチは、これらの動きを同時に満足させるための我が国独自のものである。
- 照査アプローチ A は、構造物の性能照査に用いる方法に制限を設けず、しかし、設計者が規定した性能規定を一定のある適切な信頼度で満足することを証明するアプローチである。
- 照査アプローチ B は、構造物の性能照査に当該構造物の構造的性能を総括する行政機関や各事業主体が所管する設計基準に基づいて、そこに示された手順に従い行う照査である。国土交通省港湾局では、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁷⁾を、性能規定型のコードとして 2007 年 7 月にいち早く改訂している。これらの改訂とその狙いは、貿易における非関税障壁の撤去と創造的な技術の開拓、そして設計や建設におけるコストの低減にある。しかし、性能規定型の設計の問題点として、以下の 3 点が指摘⁸⁾されている。

- 1) 性能規定で示される構造物の定性的な目的や要求性能と、使用を推奨する基準・性能規定や照査方法との間のコミュニケーションギャップの存在。
- 2) 性能規定型設計を行う場合、依然として既存の記述的仕様規定に依存するケースが多く、仕様規定と性能規定との間の定量的な関係把握を行うには、技術者が未成熟であるケースが多い。
- 3) 以上に伴う責任問題の懸念。

このような問題点は、特に仕様規定型から性能規定型に定着する間の過渡期には避けられないが、性能規定型設計への移行の大きな流れは変わりそうにない。

著者が下り組んだ地盤調査・試験・設計・施工・維持管理における性能照査法とこれらのアプローチの関係を表-1 に示す。コーンサンプラー⁹⁾を含む倍圧サンプラーは、地盤工学会基準 JGS-1221¹⁰⁾ Eurocode 7¹¹⁾ と CEN/TC341¹²⁾ のサンプリングカテゴリー A に含まれるサンプラーである。ここに、サンプリングカテゴリー A に含まれる試料は、試料採取や土試料を扱う中で、土の構造の乱れがほとんど無いか、無いもの。そして、含水比や間隙比が原位置のそれと等しく、土の構造や化学成分の変化がないと定義されている。し

表 - 1 性能照査の方法と照査アプローチの関係

段階	性能照査の方法	照査アプローチ
原位置試験	・コーン貫入試験の信頼度分析	A
	・円板引抜き試験法	A
	・小径倍圧サンプラーによる試料採取	B
	・コーンサンプラーによる試料採取	B
室内試験	・粘性土の原位置非排水強度の推定法	A
	・粘性土の原位置圧密パラメータの推定法	A
	・非排水強度特性の統計的性質の補正法	A
	・砂試料の原位置動的強度・変形特性の推定法	A
	・各種せん断試験の非排水強度特性	A
	・砂地盤の液状化判定に及ぼす試料の乱れの影響	A
設計	・粘性土の強度特性の異方性	A
	・粘性土の圧密特性の異方性	A
	・バーチカルドレーン打設地盤の圧密係数の評価法	A
	・バーチカルドレーン打設地盤の圧密沈下解析法	A
	・盛土の設計の最適化	A
施工・維持管理	・円板引抜き試験による盛土の施工管理	A
	・砂地盤の液状化判定に及ぼす試料の乱れの影響	A
	・アースダム堤体の性能評価法	A

たがって、コーンサンプラーや倍圧サンプラーは、照査アプローチ B に対応するが、表-1 に示す他の照査法は照査アプローチ A に区分される。

照査アプローチ A に区分される照査法が実務での適用や浸透に時間が掛かるのは、上述した問題点の中で、特に 2) と 3) に負うところが大きいと考えている。

3. 地盤調査・試験法の精度と設計・維持管理への影響

地盤調査・試験法の精度が設計法の枠組みの中で具体的に検討され始めた^{13),14)}のは、1977 年から始まった「土質工学における確率・統計の応用に関する研究委員会 ((社) 土質工学会; 松尾稔委員長)」の活動である。信頼性設計を実務に定着させるには地盤データの確率・統計的性質に調査法や個人差が介在しないことが前提になる。設計上の不確実性が大きく、地盤諸係数の推定精度が低い場合は、統計処理や確率論的な扱いが意味を持たないことになる。また、地盤諸係数のばらつきの原因や発生プロセスを無視して不確実性の評価を行うと不合理な設計になることもある。調査法や個人差によって設計パラメータの平均値や標準偏差が移動すると、計算される破壊確率や最適解が大きく異なるからである。このような状況下では地盤構造物の性能設計や信頼性設計

の有効性・説得力は大きくない。以下、具体的な例を幾つか示す。

1) 試験方法の差が設計結果に与える影響

土質試験法として、円板引き抜き試験¹⁵⁾と一面せん断試験¹⁶⁾を取り上げ、両者の強度の差が送電用鉄塔基礎の信頼性設計結果に与える影響を示す。表-2は設計値と設計結果をまとめている。一面せん断試験結果に関しては、JEC-127¹⁷⁾に従い、1.5で除した値(一面せん断試験/1.5)を設計値として用いている。設計標準値は、十分な地盤調査が行われない場合、 N 値や湿潤密度、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ の関係の一般的目安として、JEC-127に示されている設計値である。すなわち、砂質土に関しては ϕ のみを考慮して、細粒土に対しては一面せん断試験で得た c を1.5で除した値を設計値として採用する。

図-2は砂質土に対し、表-2に示す3つの設計値を用いて、根入れ深さ D_f が6.5mの基礎幅 B と現在価値 PV の関係を示している。設計値として大きな c を採用するほど PV は大きくなり、 B は小さくなっている。円板引抜き試験による地盤の破壊メカニズムは、鉄塔基礎の破壊時の土の挙動に近いことが分っている¹⁶⁾。この立場に立ち、円板引き抜き試験で得た強度を基準にすると、送

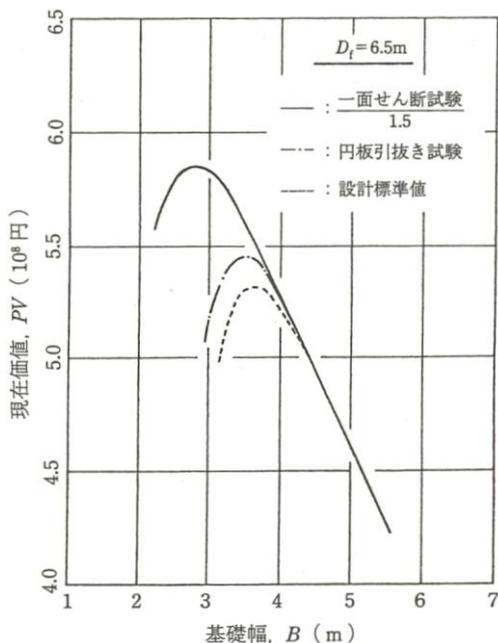


図-2 現在価値と基礎幅の関係(砂質土)

電線の総延長100km、 T 年間での PV の平均値の差を見ると、一面せん断試験の結果を用いた場合には128億7,000万円も過大評価し、設計標準値では97億2,400万円/286基も過少評価することになる。ここで対象とした送電用鉄塔基礎の信頼性設計では、送電用鉄塔という全体の設計システムが大きいため、要因として取り上げた強度係数の差が極めて大きな PV の差となっている。このような設計問題では、特に土の c 、 ϕ を適正に評価することが、ライフサイクルコスト LCC の低減を図り、リスクマネジメントの精度を上げる基本であることが分かる。

LCC の精度は修繕費のみでなく、メンテナンス費、エネルギー費、運用費(光熱水費)、一般管理費の見積りも必要である。加えて、落石等の多様な破壊形態が想定される斜面崩壊や地震に伴うリスク評価は、特に保険に代表されるリスクファイナンスの観点から、損失期待値のみでなく、そのはずれ量(標準偏差)を評価することが重要な検討課題であるとの指摘¹⁸⁾がある。しかし、実務レベルでこれらを適正に評価した最適化には、当該分野での格段の努力が今後とも必要であろう。

2) 使用サンプラーの差が設計結果に与える影響

図-3は自由と固定ピストン(75-mm)サンプラーで得た試料に対する一軸圧縮試験結果である。両サンプラーから得た試料の含水比 w_n 、湿潤密度 ρ_t は同等であるが、深さ z (26~30)mの一部を除き、自由ピストンの一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} が小さく、これらの試料の乱れが大きいことが分かる。図中の直線は最小自乗法による回帰線であり、実線が固定、破線が自由ピストンサンプラーによる q_u と z の関係である。図-4はこれらの q_u と z の関係を用いて、当該地で計画されたケーソン式護岸の設計結果である。設計安全率1.25を満足する自由ピストンの床掘り置換断面積は固定の約4倍であり、押え盛土部の砂の増加を考慮した概算工費は、3.7億円/100mを過大に見積ることになる。

表-2 送電用鉄塔基礎の信頼性設計に用いる設計値

供試土	$\bar{\phi}$ ($^{\circ}$)	s_{ϕ} ($^{\circ}$)	$\bar{\rho}_t$ (g/cm ³)	$s(\rho_t)$ (g/cm ³)	円板引抜き試験		一面せん断試験 /1.5		設計標準値	
					\bar{c} (kN/m ²)	s_c (kN/m ²)	\bar{c} (kN/m ²)	s_c (kN/m ²)	\bar{c} (kN/m ²)	s_c (kN/m ²)
砂質土1	40	8	2.00	0.060	3	1	19	6	0	0
砂質土2	35	7	1.90	0.057	7	2	23	7	0	0
粘性土1	20	4	1.80	0.054	11	3	25	8	25	8

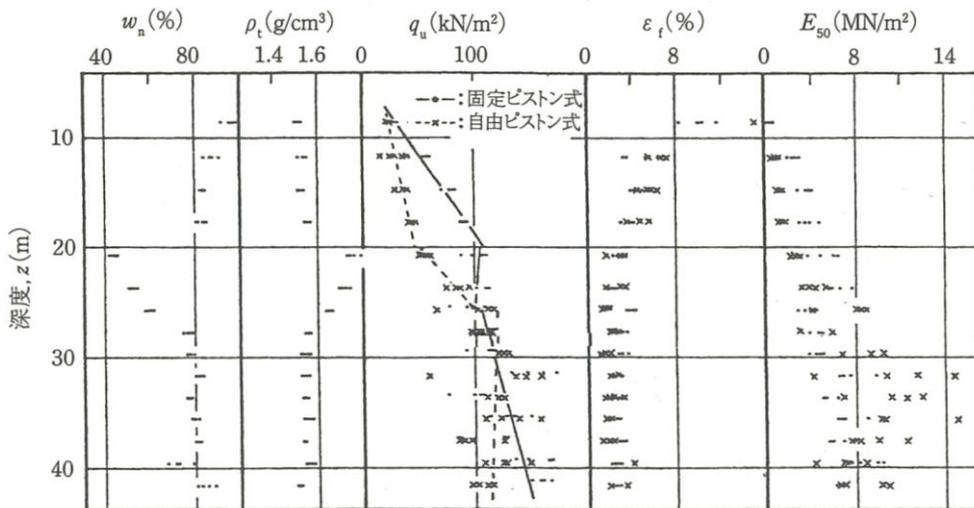


図-3 固定と自由ピストンサンプラーによる強度特性

() : 押え盛土部の砂の増加を考慮した場合

	c_0 (kN/m ²) -8mを基準			k (kN/m ²)			安全率	置換断面積 (m ²)	概算工費 (億円/㎡)
	-8m -20m	-20m -26m	-26m -40m	-8m -20m	-20m -26m	-26m -40m			
固定ピストン式	13.33	56.50	30.30	3.44	-0.40	1.24	1.257	202.8	1.06
自由ピストン式	10.98	-26.00	63.00	1.06	4.35	-0.14	1.256	834.0 (921.0)	4.34 (4.79)

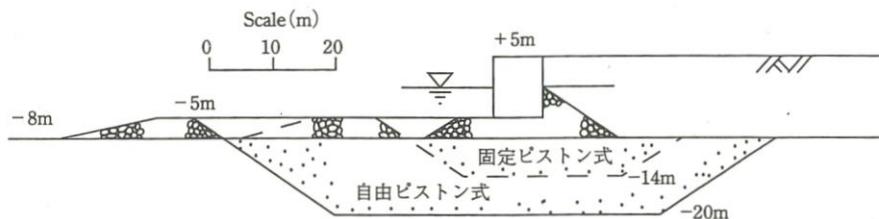


図-4 図-3の強度を用いた設計結果

自由ピストンサンプラーを用いたことは、技術者の意識力の問題であるが、このような個人差による強度差が設計結果に与える影響は、他の要因に比べても、ことのほか大きい場合があることを具体例¹⁹⁾で示した。地盤調査の多くが公共性の高い構造物をその設計対象として実施されることを考慮すると、個人差のない試験値を得る方法論の開発や一次処理方法²⁰⁾の体系化が急務である。

4. 設計法の信頼度分析と土構造物の性能評価

1) 道路盛土の信頼度分析

図-5は K_0 圧密非排水圧縮試験 K_0CUC から得た原位置の圧密降伏応力 $\sigma'_{p(l)}$ 下の原位置の非排水強度 $q_{u(l)}$ に対する q_u と、 $q_{u(l)^*}$ と $q_{u(l)}$ で示す従来法²¹⁾と簡便法²²⁾で推定した原位置の非排水強度の比を z に対してプロットしている。この図は、施工中の道路盛土が破壊した地盤強度の信頼度分析の結果であり、 $z=7m$ 以浅が高有機質土、以深が沖積粘土である。チューブサンプリング (TS)

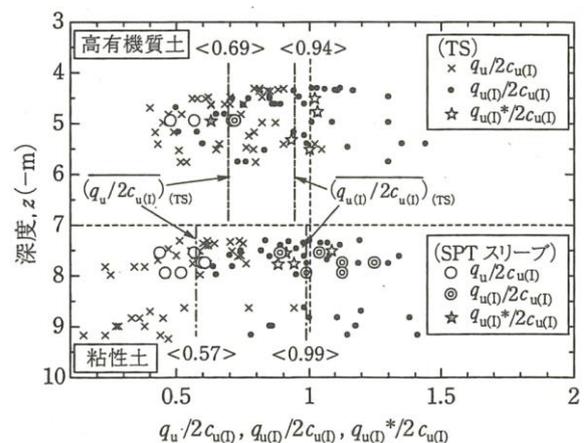


図-5 非排水強度の比較 (UCTと K_0CUC)

と標準貫入試験の SPT スリーブで採取した試料によって記号を変えてプロットしている。地盤の不均質性に起因してプロットの変動は大きい、TSによる $q_u/2c_{u(l)}$ と $q_{u(l)}/2c_{u(l)}$ の平均値は、有機質土で0.69と0.94、粘性土で0.57と0.99である。TSで採取した我が国の24の堆積地の粘性土²²⁾,

釜山粘土²³⁾, ピサ粘土²⁴⁾の $q_u/2\alpha_u(\Omega)$ の平均値は、これらの試料に関係なく 0.62 とほぼ一定であり、 q_u は K_0 CUC の $\sigma'_{p(\Omega)}$ 下の非排水強度とは大きな乖離があることが分かる。

サンプリングによる原位置からの拘束圧の解除や乱れに起因して、 q_u は $2\alpha_u(\Omega)$ の 57~69%と小さいが、測定したサクシオンと q_u を用いて推定した $q_u(\Omega)$ は、 $2\alpha_u(\Omega)$ と同等の値が推定できている。また、SPT の q_u は TS のそれより小さく乱れが大きいが、 $q_u(\Omega)$ や $q_u(\Omega)^*$ は $2\alpha_u(\Omega)$ と同等である。これらの推定法^{21),22)}は試料の乱れの程度に関係なく $2\alpha_u$ と同等の値が推定できることが分かる。

小型供試体のサクシオンは測定系の脱気が十分であれば1分足らずで測定できる。サクシオン測定を伴う一軸圧縮試験法²⁵⁾から、 K_0 CUC と同じ非排水強度が推定できる事実は、基礎研究のみでなく、設計信頼度の向上に対しても実務的な価値が大きい。

図-5 で述べた $q_u/2, q_u(\Omega)/2, \alpha_u(\Omega)$ に加え、コーン貫入試験のコーン係数 M_{kt} を 10 とし得た非排水強度 $\alpha_u(\text{CPT})$ を用いて計算した道路盛土築造の総費用 C_t と供試体数 n の関係を図-6 に示す。総費用の最小値 $C_{t(\min)}$ が最適解(図中の矢印の位置)であるとの判断(期待総費用最小化基準)に立つと、これらの非排水強度を用いた C_t と供試体は、それぞれ 1044 千円(供試体数 223 個), 730 千円(同 27 個), 725 千円(同 3 個), 1185 千円(同 2 個)となる。 $\alpha_u(\text{CPT})$ は $M_{kt}=10$ から得た α_u が実盛土の破壊を説明する非排水強度より小さいため、 n が増加しても C_t が低下しない。さらに、 $q_u/2$ は盛土荷重による活動力より抵抗力(非排水強度)が小さいため、 $C_{t(\min)}$ となる n は 223 個となり現実的でない。実測した非排水強度異方性を考慮した安定解析から、 $q_u(\Omega)/2$ は盛土の破壊の変状を説明する強度として整合している²⁶⁾ことが分かって

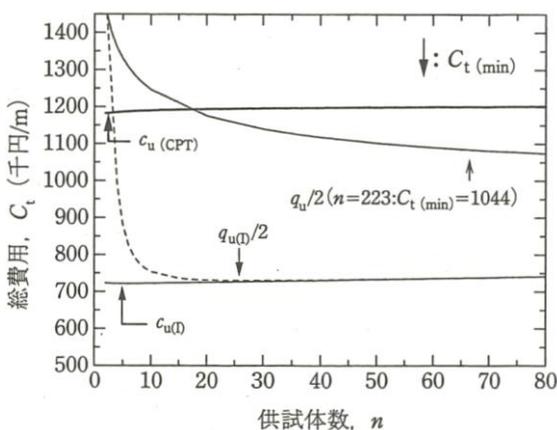


図-6 総費用と供試体数の関係(道路盛土)

いる。また、 n の増加に見合う C_t の低下が著しい。すなわち、非排水強度に $q_u(\Omega)/2$ を用いると、調査・施工・維持管理を含む総費用の削減効果が大きいことが分かる。

このような軟弱地盤上の盛土の設計においても、調査・試験・設計・施工に含まれるラッキーハーモニー^{27),28)}が今日でも成立している保障はない。これらのハーモニーが調べられたのは 50 年程前のことであり、調査・試験・施工法の進展やこれらが安全率に与える変化が同じと考えるには無理があるからである。

2) アースダム堤体の性能評価

関東ロームを用いて約 90 年前に築造されたアースダム堤体のレベル1地震動を想定した性能評価を検討した。図-7 はダム堤体からコーンサンプラーを用いて採取した試料から得た $q_u/2, \alpha_u(\Omega), q_u(\Omega)/2$ を用いて、図-6 と同様に検討した総費用と供試体数の関係²⁹⁾である。 C_t が最小となる n , 破壊確率 P_f , C_t を図-7 の表にまとめた。 $q_u/2$ は強度が小さいことに起因して、 n が増しても C_t が低下することはなく一次関数的に増加している。一方、 $q_u(\Omega)/2$ は n が増加すると非排水強度の平均値の信頼度が向上して C_t の低下が著しい。 $C_{t(\min)}$ の n は $q_u(\Omega)/2$ で 11, $\alpha_u(\Omega)$ で 9 であるが、試験費用の差を反映して C_t は、それぞれ 365 百万円/m, 311 百万円/m となり、 $q_u(\Omega)/2$ は $\alpha_u(\Omega)$ より 17%大きい。両強度の平均値は同等であるが、 $\alpha_u(\Omega)$ の試験個数が 8 と少なく、このデータの標準偏差が幾分小さかったことが n と C_t の差になっている。標準偏差に差がなければ $q_u(\Omega)$ は、 $\alpha_u(\Omega)$ と C_t に加え、力学的にも同じ結果を与えることになるが、試験費用の観点からは $q_u(\Omega)$ が有利になる。

採取試料の品質確保を前提とすれば、地盤強度採用値も性能規定が可能となる。また、各種せん断・応力条件下の強度・圧密特性がコーンサンプ

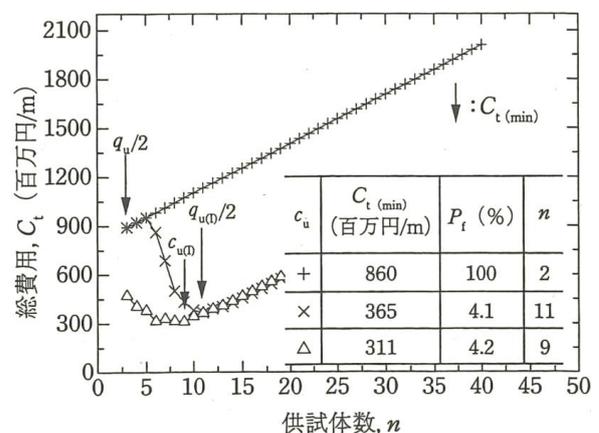


図-7 総費用と供試体数の関係(ダム堤体)

ラーで採取した $d48 \text{ mm}$ の試料片から測定できるので、小型供試体は調査・試験費用の削減に加え、調査・設計の精度向上への寄与が大きい。加えて、原位置非排水強度として q_{u0} を用いれば、同じ外力下で盛土形状をスリム化できる可能性もある。

JGS 4001-2004⁶⁾ は、地盤パラメータの代表値（特性地）として一次処理を経たデータ（導出値）の算術平均でなく、複数の調査・試験法の結果の整合性を総合的に判断して求めた注意深い平均値の採用を提案している。表-1 に示す性能照査の方法もその判断材料として有効であると考えている。

5. 地盤リスクとリスクマネジメントの課題

著者は 40 年ほど前に実務で地盤調査・土質試験・設計業務に従事していた。当時の地盤調査法・試験法の枠組みの基本は、何ら変わることなく今日にそのまま受け継がれている。設計法に変化が無ければ、そこに用いる土質試験法や土質パラメータの決め方にも変更の余地が少ないことは自明なのかもしれない。完成された設計法があり、そのための成熟した地盤調査・試験法があるなら、変化が無いことに疑問を挿む余地も少ないかもしれない。しかし、これらの技術は果たして成熟し、完成された域にあるのだろうか？ 著者が研究対象とする安定問題も変形問題も、図-2～図-7 に示した実態を考慮して、設計法とそれに用いる地盤調査・試験法の精度を俯瞰すると、広く実務レベルでそのような完成域にあるとはとても思えない。また、これらの実現象も十分に説明できるほど理論も論理体系も整った段階にあるとは著者には思えない。

国や団体の規格・基準を容認し ISO としての統一化によって、設計法、調査・試験法の性能規定化への道筋は整いつつあるが、具現化に向けた足腰は、まだとても重い。これらの施策が大胆に行えるのは、2 章で述べた 3 つの指摘が満たされる特定の大規模プロジェクト³⁰⁾等に限られるのが現実である。社会資本整備や公共投資への予算増が追い風となっている側面を認めつつも、やはり地盤工学の進展・体系化・技術に対する閉塞感は不拭出来ない。

前章までに述べた地盤調査・試験・設計法の精度の改善は、そのまま今後の課題でもある。我々が対象とする地盤は、その生成過程に起因して不均一・複雑であるため、それらの地域性をも踏襲した方法論の開発が余儀なくされる。また、従来の規格・基準やそれらの結果との整合性を図るた

め、革新的な地盤調査・試験技術であっても、実務への浸透には多大な時間と労力を費やし、ゆるぎない実績の積み重ねが要求される。

幅広い地盤工学の中で、著者が扱った地盤調査・試験・設計法の一部を採り上げ、地盤リスクとリスクマネジメントの課題を述べた。しかも、本章の展開上、採取した試料から設計パラメータを求め、設計・施工管理を行う安定問題を中心とした。水砕配合による高盛土の円板引抜き試験による施工管理¹⁵⁾のように、一連の地盤調査・試験・設計・施工のフレームに見合う調査・試験法が無い場合やサウンディングとしてのコーンサンプラーの適用、また変形問題の設計等に関しては拙書⁴⁾で詳述している。

6. 三重津海軍所（世界遺産）杭遺構の地盤工学的分析

歴史的建造物や史跡は、時空を超えた感動とロマンを人心に与える。建造物や史跡の構築に秘められた人間模様の多様さや英知・密度の濃さからなる芸術的な態様が、そして地盤と人の生業の歴史が、それらの建造物を通して我々に語らしむに違いない。事実、富岡製糸場や三重津海軍所は、人類共通の普遍的財産として、世界遺産に登録されている。本章では、著者が検討した幕末から明治期の歴史的建造物の地盤工学的検討として、表-1 に示す性能照査法として、原位置調査法としての小径倍圧サンプラーによる試料採取法、室内試験法としての粘性土の原位置非排水強度・圧密パラメーターの推定法と、小型供試体による一・三軸圧縮試験、圧密試験を用いて、三重津海軍所遺構の地盤工学的な検討例を示す。

6.1 概要

三重津海軍所 (MNF : Mietsu Naval Facility)³¹⁾ は、佐賀藩が秘密裡に設立 (1858 年) した軍事施設であり、2015 年に「明治日本の産業革命遺産」の構成資産の一つとして、世界遺産に登録された。同船屋地区 (SBD : Small Boat Dock) には、大型の木造建物が建設されていた記録³²⁾と整合する基礎体 (木杭) が発掘調査で確認されている³³⁾。この木杭周辺の含水比 w_n と非排水強度 c_u の測定値から木杭の設置方法や荷重履歴・役割、施工法等が検討されている^{33), 34)}。

MNF の杭遺構の周辺地盤の w_n と c_u の挙動と、モデル試験³⁵⁾で検討した半割杭の貫入による周辺地盤の変形挙動は同様であった。MNF の杭遺構は、A~E の 4 列から構成されているが、これらの検討³⁴⁾では、すべての杭は打込により施工されたと推察

された。E 列杭は A 列杭に比して杭長が短く、打込が周辺地盤に及ぼした影響が小さく、またコーン貫入試験、含水比、一軸圧縮試験の結果は、打設後に上部荷重を受けていないことから、群杭内の他の 2 本の松杭で上部荷重を支持したと推察された^{34),36)}。

Matthews³⁷⁾は、今日のスイスに生活していた約 6,000 年前の新石器時代の人類が、野生動物から身を護るために木杭によって支えられた足場の上に家を建て生活していたことを述べている。これらの構造物の遺構は、ルーセン (Lucern) 湖に今日なお遺っている。B.C.1620 年頃、ローマ人は 1,000 年以上に亘りローマのティバー (Tiber) 川を横断する木橋を建設した。ローマの道と水道の中には、木杭によって支持され、その後 1,900 年経ても良好な状態のものがある。ローマ人はまた、A.D.60 年頃に木杭でロンドンのテムズ (Thames) 川を横断する最初の橋を建設した。ベネチア (Venetian) 人は、B.C.100 年から A.D.400 年頃に木杭の上に家屋を建設した。

1902 年に崩壊したベニス (Venice) の聖マーク (St.Mark's) の鐘楼の調査で、A.D.900 年に打設された水中下の木杭が良好な状態で発見され、それらは鐘楼の再建に用いられたことを Chellis³⁸⁾が述べている。アムステルダム (Amsterdam) の多くの家屋は、自然堆積土の上部層がロームと緩い砂であることから、4.3~18.3m 長の打設杭の上に建造されている。また、アムステルダムの王宮 (Royal palace) では、地中 21.3m の深さに 13,659 本の木杭が 1648 年に打設されている³⁸⁾。しかしながら、SBD に遺されている A と E 列杭の下端が水平な杉杭は、これらの中にも類例がなく、施工法の記録もないことから、SBD の杉杭の目的や支持機構は明らかではない。

本稿は、この木杭が周辺土に与えた影響を検討したモデル試験^{34),36)}と同じ視点で、同地区の木杭周辺土の強度・変形特性の変化を先のモデル試験の結果³⁴⁾を含めて考察する。また、この建物は、造船用の木材の貯蔵庫であったと考えられている³²⁾が、敷地内の地盤に残る建物や木材の荷重履歴に関しても検討する。これらは、当時の歴史的資が残されていないことから、今日の地盤工学を駆使して、その実体を探る謎解きになる。

6.2 地盤概要と杭遺構の状況

杭遺構は、佐賀市の MNF の敷地内にある。この

敷地は、写真-1 に示すように修復場 (Shipbuilding), 稽古場 (Training ground), 船屋 (SBD) の 3 つに区分され、2016 年度から文化庁の指導の下に佐賀市教育委員会が地盤工学的な一連の遺構調査を行っている^{33),34),36),39)}。

図-8 は、写真-1 に示す SBD で発掘された A, B, C, D, E 列の木杭の位置を示している。これらは、SBD の開削部内で発掘されたものであり、同地区全域の杭遺構の位置を示したものではない。C, D, E 列杭は B2~B4 列杭の北側の開削部分で発見されているが、試掘されていない B4 列以降の北側にも同様な C, D, E 杭がその西側部に配置されていると予想されている。

図-9 に、図-8 に示す Bor.6 と 7 から得た土質断面面図を示す。Hc1 層は均質性の高い蓮池粘土であり、



写真-1 三津津海軍所全景

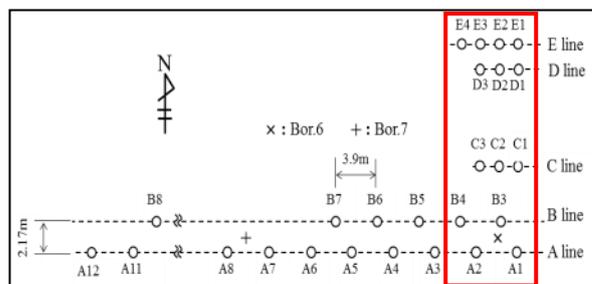


図-8 船屋地区の遺構杭とボーリング位置

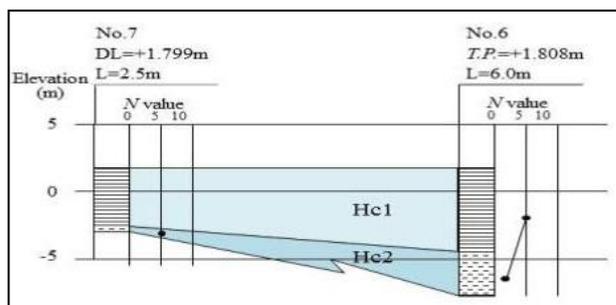


図-9 Bor.6 と 7 から得た土質断面面図

表-3 Bor.6 と 7 で得た試料の指標的性質

Borehole	Depth	w_n	ρ_s	Gravel	Sand	Silt	Clay	w_L	w_P	I_P
	(m)	(%)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
6	0.2~1.5	110.3	2.59	0	3.2	49	47.8	114.6	51.4	63.2
7	0.2~1.5	119.1	2.59	0.1	3.9	53.8	42.2	126	56.1	69.9

Hc2 層は貝が多量に含まれる粘性土である。Bor. 6 と 7 は掘削面(T.P.+1.8m)から 0.2~0.8m と 0.9~1.5m の深度 z で 45-mm サンプラー⁴⁰⁾を用いて、乱れの少ない試料を採取した。採取試料に対しては、直径 d 15mm, 高さ h 35mm の小型供試体⁴¹⁾から一軸圧縮強さ q_u を測定した。ポータブルコーン貫入試験 PCPT によるコーン貫入抵抗 q_c は、深度 z に対して 10cm 毎に測定している。Bor. 6 と 7 から得た試料の指標的性質を表-3 にまとめた。砂分を 3~4%程度含むが、シルト 50~54%, 粘土 42~48%, 塑性指数 I_p 63~70% の高塑性粘性土である。自然含水比 w_n は、110~120% と高い。

図-10 は、一軸圧縮試験結果から得た土性図である。一軸圧縮強さ q_u とサクシオン S_0 から推定した原位置の非排水強度 $q_{u(1)}$ ²²⁾ を q_u の欄に併記している。ここで、 $q_{u(1)}$ は、供試体の平均圧密圧力 p_m を有効土被り圧 σ'_{v0} の 2/3 (=33kN/m²) として求めている。

SBD は、掘削面から 1.4m の z (標高 T.P. -0.7m) で貝殻が 70~80% 含まれる粘性土が堆積している。この層の N 値は 3~5 であり、Bor. 6 では約 5m の層厚で、T.P. -4.4m で貝殻を含まない砂層に変化する。PCPT の貫入抵抗から換算した非排水せん断強度 c_u を標高 E に対して図-11 にプロットした。地表から 2m 程度開削した際の工事や乾燥等に起因して、 $E=1.5\sim 2.0$ m の深度の c_u は、25~50 kN/m²

と大きい。 $E=0.48\sim 1.58$ m の深度は、 $c_u=10\sim 20$ kN/m² の範囲にあり、43m 程度の A1 と A12 杭の測線長を考慮すれば、水平方向の連続性が極めて良好な粘性土地盤と判断される。PCPT は、 $E=0\sim 0.3$ m の深度で 2 人の体重 (約 110 kgf) 下で貫入不能となる層に到達し、この層は Bor.6 で確認された貝殻混じり粘性土層に対応している。

図-12 と 13 は Bor. 6 周辺で行った PCPT の位置とその結果である。CPT の 19 箇所測定位置が近接していることを反映して、 c_u の変動も図-11 のそれより小さく、深度とともに c_u が漸減している。 c_u の平均値 \bar{c}_u は $E=0.6$ m で 17 kN/m², $E=1.5$ m で

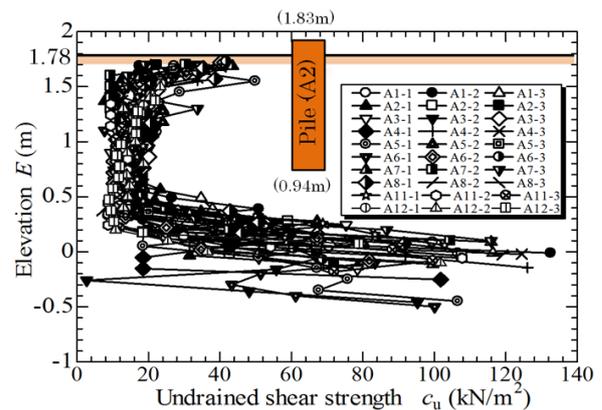


図-11 PCPT から得た c_u と E の関係

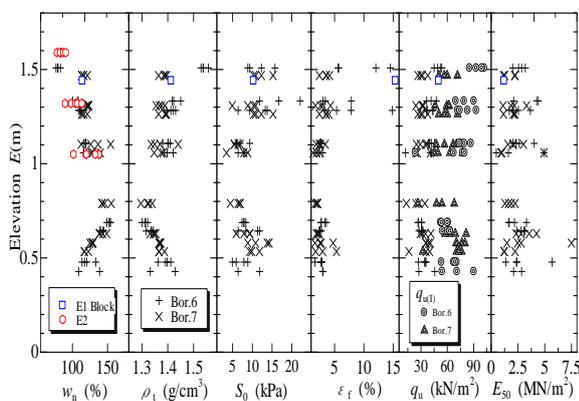


図-10 一軸圧縮試験から得た土性図

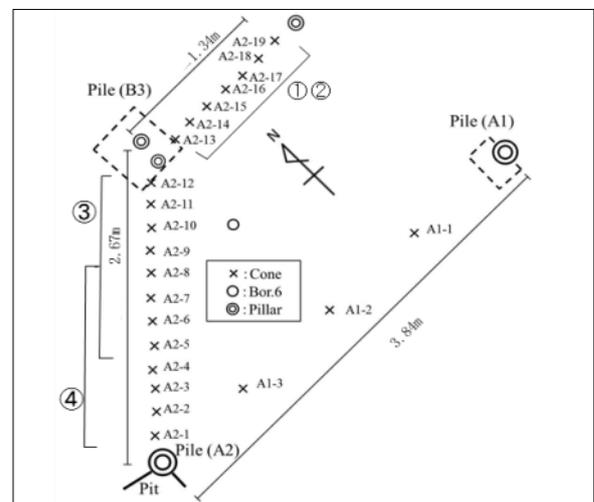


図-12 Bor.6 周辺の PCPT 位置

19 kN/m²であるが、深度に関係なく 7 kN/m²程度の変動を有している。

図-14 と 15 は E1 から E4 杭間の PCPT の調査位置と結果である。E 杭周辺地盤の強度特性も A 列杭のそれらと同等であり、SBD の杭遺構のある地盤全域の蓮池層は、穏やかな環境下で均質に堆積していることが分かる。

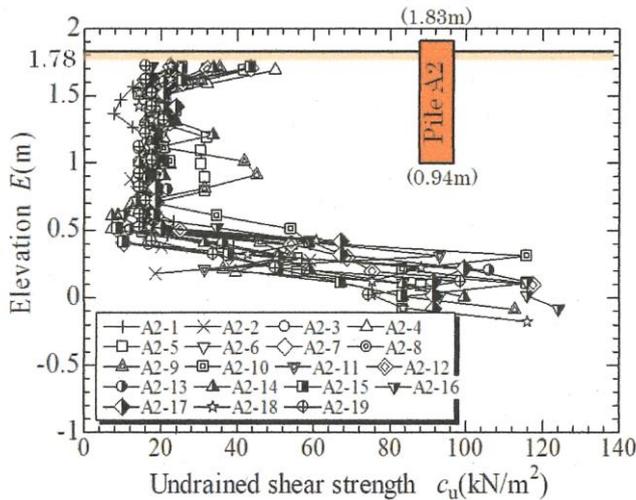


図-13 A1 と A2 杭周辺の PCPT 結果

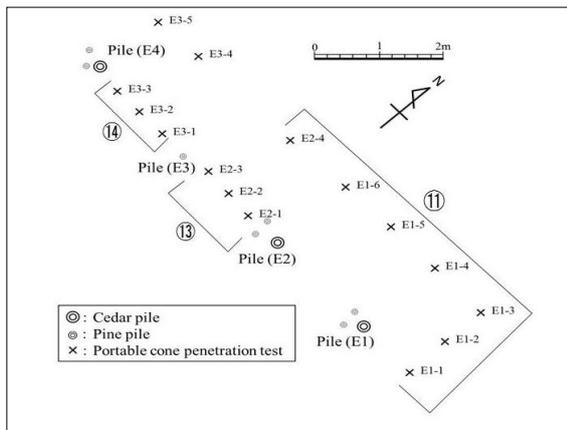


図-14 E1 から E4 杭周辺の PCPT 位置

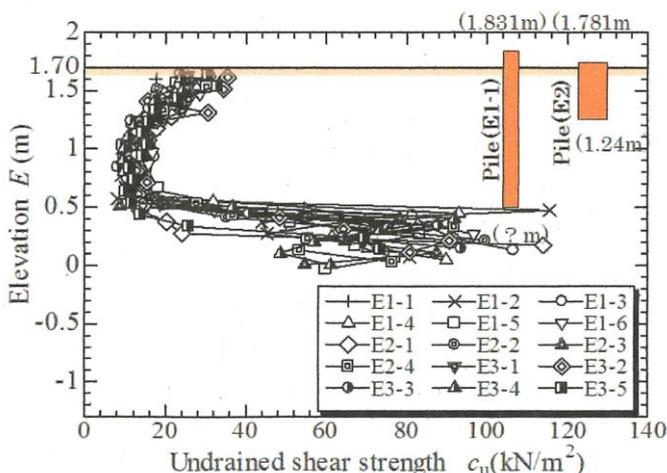


図-15 E1 から E4 杭周辺の PCPT 結果

A 列杭は、 d が 20cm の樹皮なしの杉丸太 (写真-2) であり、下端が水平に切断され、支持層である牡蠣層上の蓮池層中にある。B 列杭は、写真-3 に示すように d 10cm の樹皮付の松丸太 3 本の群杭として、杭先端角 30° 程度に加工されてこの牡蠣層に打込まれている (写真-4)。C と D 杭列は、B 列杭のそれと同じ形式であるが、E 列杭は写真-5 に示すように、A 列杭の杉丸太と B 列杭の松丸太 2 本の群杭として施工されている。杉丸太の下端は、蓮池層中にあり、水平に切断されている。



写真-2 A と E 列の杉杭 (樹皮なしで下端が水平)



写真-3 B,C,D,R 列の杉杭 (樹皮付で下端鋭角)



写真-4 牡蠣層に打設された松杭 (B,C,D,E 列杭)

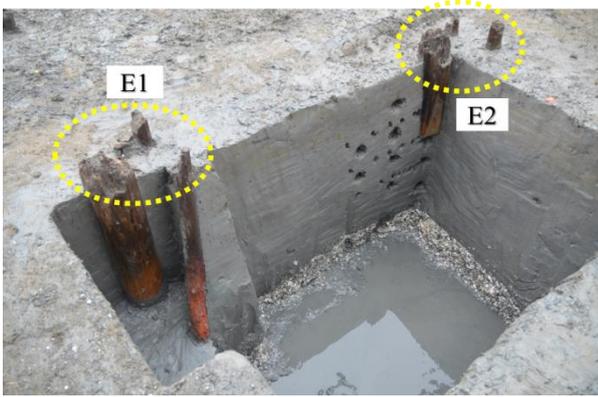


写真-5 E1とE2杭のトレンチ

6.3 杭周辺土の強度特性

B2, B3, A2, A7, A8, A11, E1, E2, E3, E4の10本の杭周辺土の強度特性をPCPTから得た c_u の結果から考察する。これらの杭は打込杭であることが明らかにされている^{34), 36)}が、ここでは、打設後約160年後の周辺地盤の強度特性の変化を検討することになる。

図-16は、SBDの開削部の杭遺構のうち、上記10本の杭とそれらの打設による地盤強度の変化を検討する領域(数字に○で表記)を示している。これらの領域は、杉杭8本、松杭5本の計13本であり、このうちE1, E2, E4の3本は両杭を組み合わせた群杭である。杭とPCPTの平面位置を図-12, 14, 17, 18に示す。開削面から鉛直下向きに貫入するPCPTは、これらの図に示すように杭周面からの距離 D_p が5~368cmで行っている。

図-19, 20, 21, 22, 23は、図-16に示す13の領域の中から、それぞれ④, ⑥, ⑦, ⑫, ⑬の領域の非排水強度 c_u を E に対してプロットしている。④⑥⑦が杉杭、⑫と⑬が松と杉杭であり、これらの打設が周辺地盤に与えた影響を検討することになる。杭打設が周辺地盤に与える影響を検討するため、 D_p は80cm程度までの範囲のPCPTの結果を示している。図-19を見ると、同じ E 下の c_u は、同等の c_u を示し D_p との関係が明瞭でない。しかし、図-20と21のA7-20とA7-45は、杭表面からそれぞれ5cmと15cmの D_p にあり、 c_u が大きく、杭貫入による過剰間隙水圧の発生と消散による c_u の増大が窺える。一方、図-22と23に示す同じ E 下の c_u は、 D_p に関係なく同等の値であり、杭打設の影響はないと判断される。

図-19~23で明瞭でなかった杭打設が周辺土に与えた影響を定量的に検討する。図-19, 20, 21に

対して、杭打設が地盤に与える影響の外にある c_u の平均値 \bar{c}_u に対する影響範囲内の c_u の比を E に対して、それぞれ図-24, 25, 26, 27に示す。例え

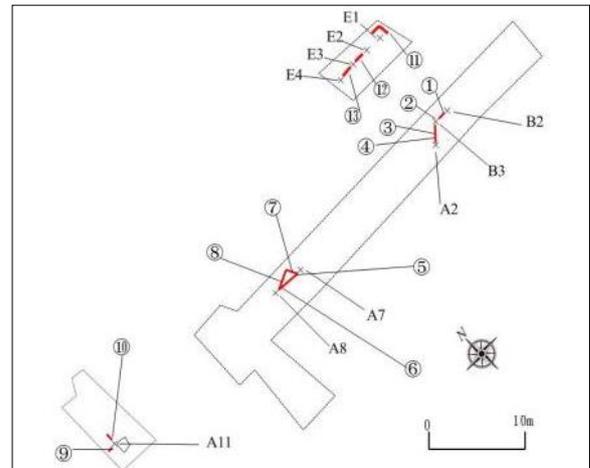


図-16 船屋地区開削域と杭打設の影響を検討する領域

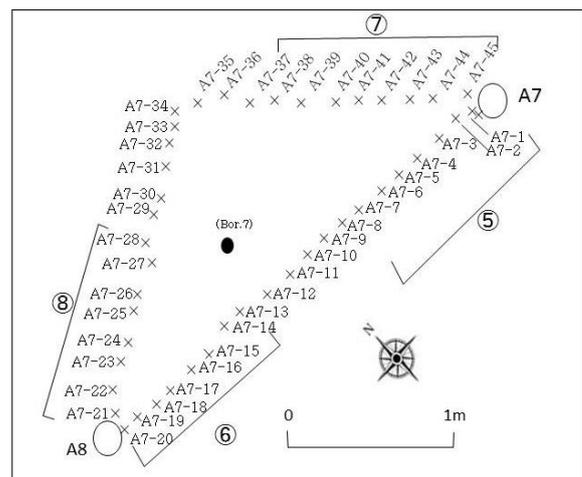


図-17 Bor.7周辺のPCPT位置

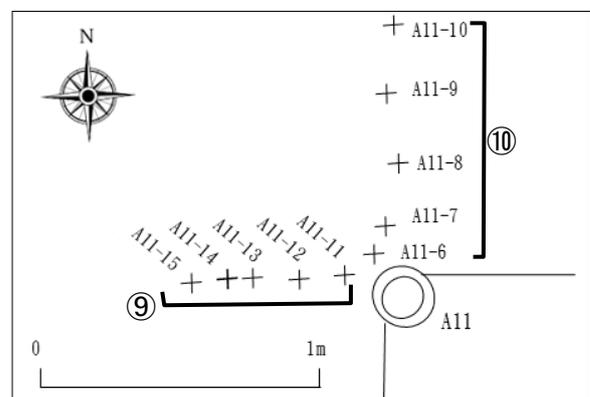


図-18 A11杭周辺のPCPT位置

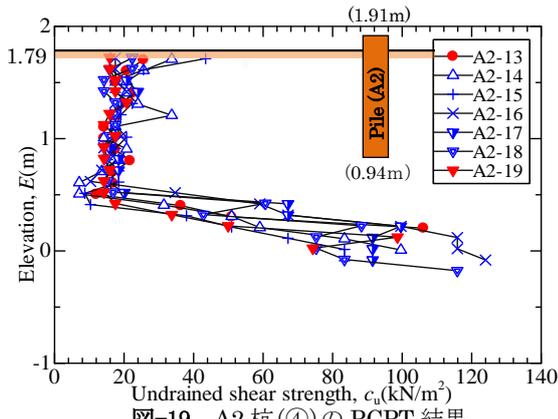


図-19 A2杭(④)のPCPT結果

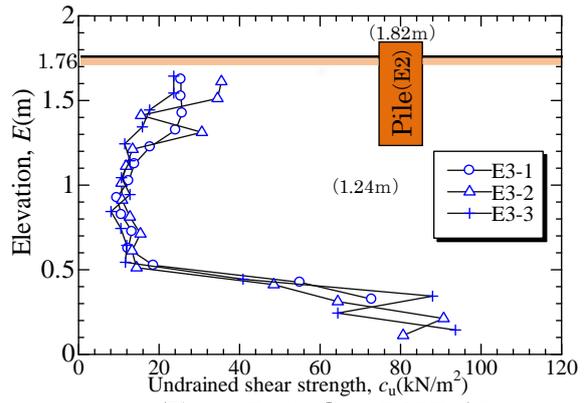


図-23 E3杭(③)のPCPT結果

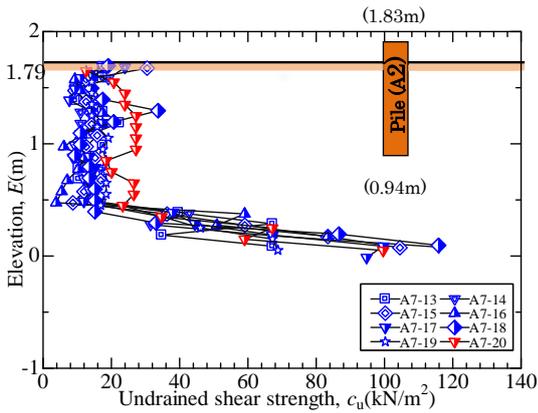


図-20 A7杭(⑥)のPCPT結果

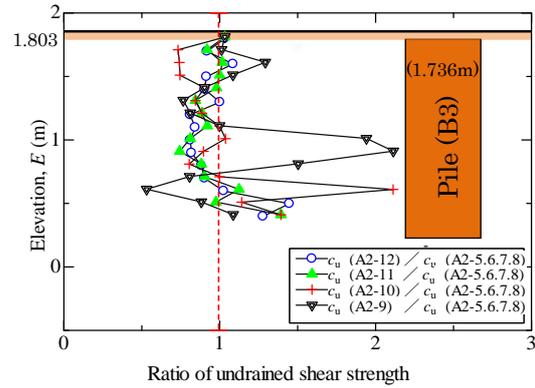


図-24 R_{α} と E の関係 (A2-9,10,11,12)

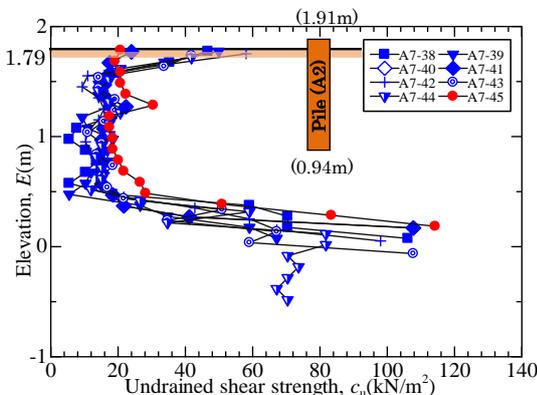


図-21 A7杭(⑦)のPCPT結果

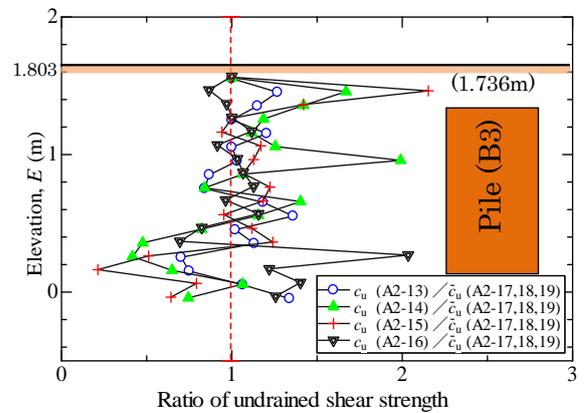


図-25 R_{α} と E の関係 (② : A2-13,14,15,16)

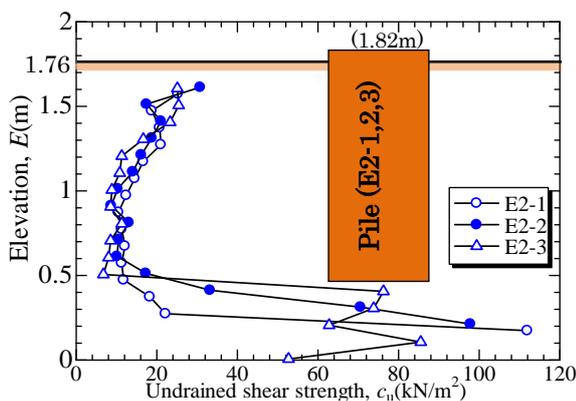


図-22 E2杭(⑫)のPCPT結果

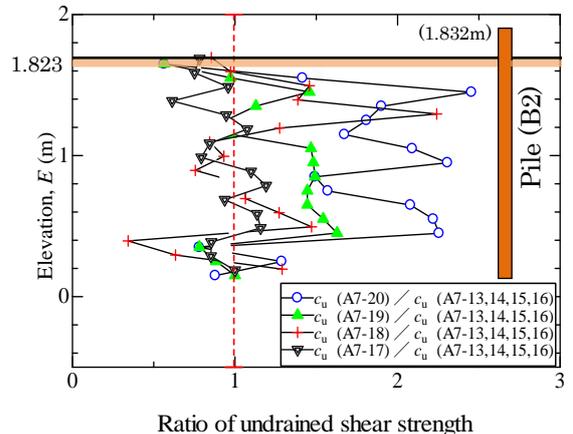


図-26 R_{α} と E の関係 (⑥ : A7-17,18,19,20)

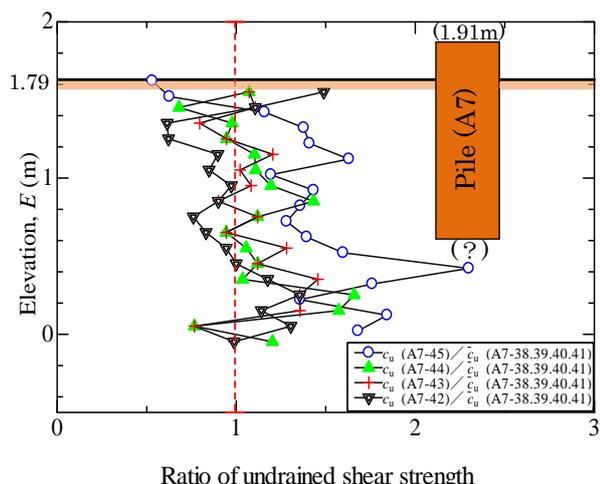


図-27 R_{cu} と E の関係 (⑦ : A7-42,43,44,45)

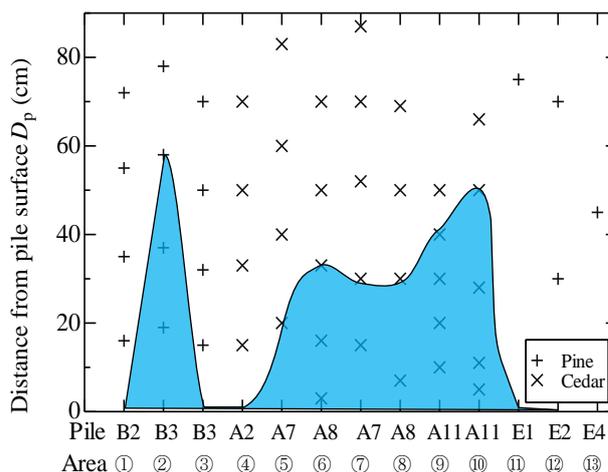


図-28 13の領域の杭打設の影響範囲

ば、図-25 では、A2 の 17, 18, 19 の PCPT による同じ E 下の \bar{c}_u に対する A2 の 13, 14, 15, 16 の c_u の比 R_{cu} を E に対してプロット (それぞれ、○, ▲, +, ▼) している。これらの検討は、杭打設の影響を受けていない周辺の地盤に対する B3 杭打設の影響の検討である。B3 は写真-3 と 4 で示したように、 $d10\text{cm}$ の 3 本の松杭が群杭として牡蠣層に打設されている。杭下端までの $E=0.2\text{m}$ の深度までは、大部分の R_{cu} が 1 より大きく、この領域の D_p の範囲は、杭打設による c_u の増加がある。そして、A2-14 ($E=1.0\text{m}$)、A2-15 ($E=1.5\text{m}$)、A2-16 ($E=0.15\text{m}$) は、杭打設の影響のない範囲の c_u の約 2 倍程度大きな値になっている。これらの D_p は、それぞれ 18cm, 55cm, 75cm であり、群杭径を 40cm とすると、最大でその 1.88 倍の影響範囲となる。

一方、図-24 に示す A2-5, 6, 7, 8 の \bar{c}_u に対する A2-12, 11, 10, 9 の R_{cu} は、1 を下回る値が多く、これらの D_p (それぞれ 17, 36, 57, 73cm) の範囲内に群杭打設の影響がないことを示している。

図-26 と 27 は、それぞれ領域⑥と⑦の結果である。前者が松の群杭、後者が杉杭である。図-26 では、A7-20 ($D_p=15\text{cm}$) の R_{cu} の最大値 $R_{cu(\max)}$ (○) が約 2.5 と大きく、1 以上の R_{cu} は、A7-19(▲) と A7-18(+)の D_p (それぞれ、16, 33cm) の範囲内である。一方、図-26 の場合、 $R_{cu(\max)}$ は、A7-45(○) の $E=0.6\text{m}$ の 2.3 であり、 $R_{cu}>1$ は、それぞれ A7-44(▲ : $D_p=30\text{cm}$) と A7-43(+ : $D_p=15\text{cm}$) である。

図-24, 25, 26, 27 と同様に検討した 13 のすべての領域の $D_{p(\max)}$ を図-28 にプロットした。各領域の $D_{p(\max)}$ の範囲を青色で包絡しているが、領域①, ②, ③は松杭(+), ⑪, ⑫, ⑬は、松と杉杭、他は

杉杭(x)である。E1(⑪), E2(⑫), E3(⑬)は、PCPT を測定した D_p の最小値は、それぞれ 5cm, 10cm, 15cm であり、5~15cm の範囲内で、杭打設が周辺地盤に影響していないと判断される。B3 の群杭に対して、領域①と③に対しては、 D_p の最小値である、それぞれ 13cm と 18cm の範囲内で、杭打設が周辺地盤に影響していない。しかし、同じ B3 杭でも②に対しては、約 60cm 程度まで影響している。群杭径として 40cm とすると群杭表面から 1.5 倍の範囲で、地盤は杭打設の影響を受けていることになる。杉杭の A2 は④に対して $D_p=10\text{cm}$ の範囲内で c_u の増加はなく、杭打設による影響はないと判断される。同じ杉杭の A7, A8, A11 の $D_{p(\max)}$ は、⑤ ($D_p=30\text{cm}$)、⑥ ($D_p=50\text{cm}$)、⑦ ($D_p=52\text{cm}$)、⑧ ($D_p=30\text{cm}$)、⑨ ($D_p=45\text{cm}$)、⑩ ($D_p=53\text{cm}$) であり、最大の領域⑩でも 20cm の杭径の 2.5 倍の範囲である。

以上示したように、杭から任意の D_p で鉛直方向に測定した PCPT から得た c_u の変化は、A11, A12, E2 杭を横断するトレンチの壁面で行った水平方向の PCPT の c_u や w_p の結果^{33), 34), 36)}とも整合している。

6.4 川崎粘土に貫入した杭周辺の変形挙動(モデル試験結果)との対応

図-24~27 の検討と同様に行った B3, A2, A7, A8, A11 杭周辺の各 E の D_p を、それぞれ図-29~33 にプロットした。 D_p は、各 E 下の R_{cu} の最大値を包絡する値をプロットしている。また、杭の左右には、対象領域の番号も示している。トレンチによる開削がない B3 (図-29) は牡蠣層への打込杭であり、PCPT による牡蠣層の深度から推定した A7 (図-31) と A8 (図-32) の杭下端の E には、? を表記した。また、これらの図には、川崎粘土に対するモ

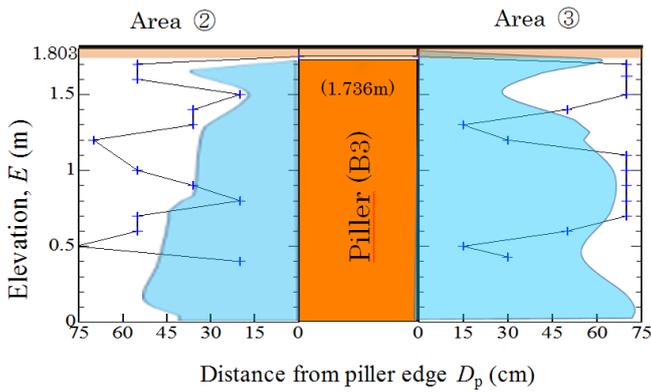


図-29 B3 杭(②と③)の D_p と E の関係

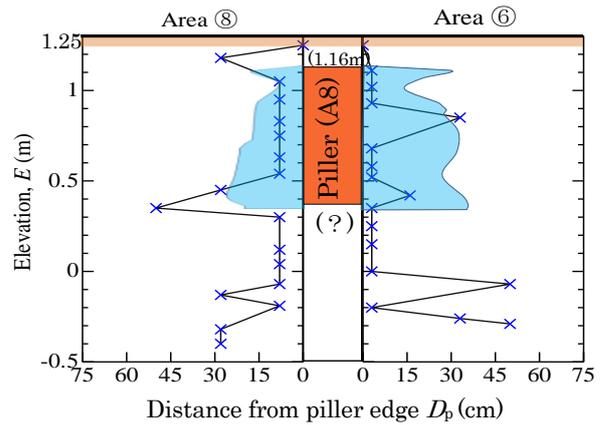


図-32 A8 杭(⑥と⑧)の D_p と E の関係

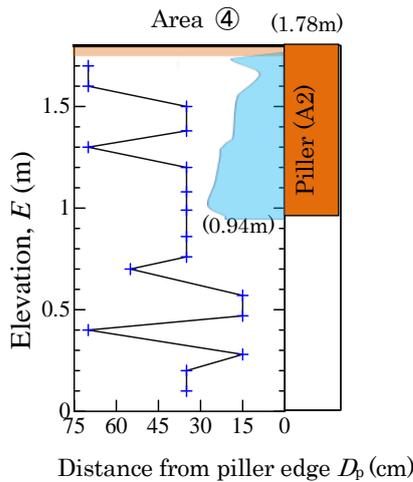


図-30 A2 杭(④)の D_p と E の関係

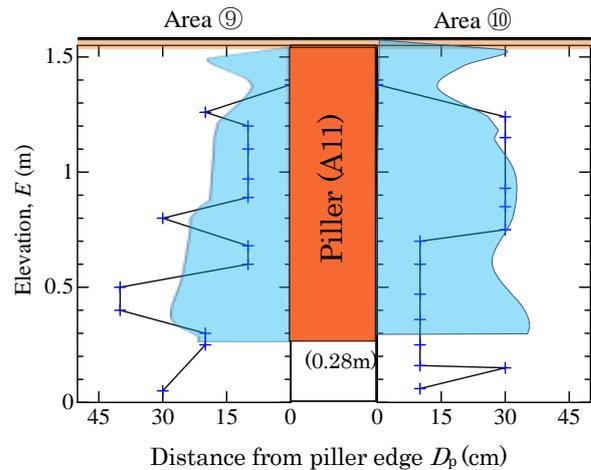


図-33 A11 杭(⑨と⑩)の D_p と E の関係

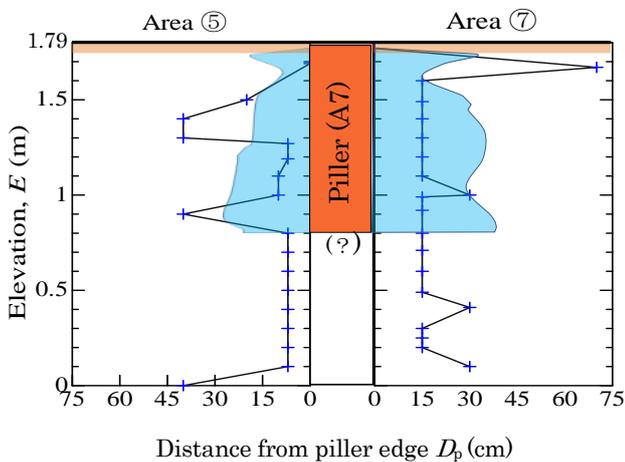


図-31 A7 杭(⑤と⑦)の D_p と E の関係

デル試験の結果^{34),36)}を青色によって示している。これらの青色は、モデル試験の杭径(3.5cm)と杭長(32cm)に対する杉杭は20cm, B3の松群杭径は40cmと長さの比を D_p に対応して整理している。

川崎粘土の I_p は 68.5% であり蓮池粘土と同様な高塑性粘性土である。また圧密終了後の q_u は、44kN/m² の地盤である。したがって、川崎粘土のモ

デル地盤は SBP の蓮池粘土に打設された杭と同様な扱いができると考えている。

図-29~33の結果は、SBDの実杭とモデル試験の D_p は、比較的よく対応していると判断される。また、AとE列の杉杭は、図-19, 20, 21, 23で示しているように牡蠣層の上の蓮池層中にある。E2杭の場合、杭直下に及ぼす杭打設の影響は、杭径に近い³⁶⁾ことも明らかにしている。このことは、SBDの実杭が打込み杭である^{34),36)}ことを補強する結果であると判断される。

米国の木杭審議会⁴²⁾は、軟弱な正規圧密粘土の場合、杭打設による杭下端と断面方向の土の攪乱は、杭径に近いことを示している。粘性土における杭の打込み過程は、大きな間隙圧が発生し、間隙水圧の増加は、土と杭の載荷能力を減少させる。そして、その後が発生する粘性土の過剰間隙水圧の消散と再圧密は、土のせん断強度と杭の載荷力の増加につながる。図-29~33で示したB3, A2, A7, A8と、A11³⁶⁾杭周辺の強度の増加やA11, A12, E2杭のトレンチ内で行った水平方向のPCPTや w_0 の変

化^{33), 34), 36)}は, 米国の木杭審議会⁴²⁾や Cummings⁴³⁾の見解と同様である. 以上の考察は, SBD の杭遺構は打込杭であるとした結果^{33), 34), 36)}を補強し, 打設後約 160 年を経ても打設直後の地盤の攪乱や過剰間隙水圧の消散に起因する地盤の強度特性, w_n の変化や影響範囲は, 間隙水圧消散後は大きな変化がないことを示している.

米国の木杭審議会 (Timber Piling Council)⁴²⁾や Cummings⁴³⁾は, 彼ら自身の主張を裏付ける根拠や実証的な結果を示していない. その意味でも本稿の結果は重要であると考えている.

6.5 船屋地区東端部の地盤表層部の荷重履歴

木杭間の地盤表層の荷重履歴を土壤硬度計の貫入深度から測定して, 建物内部に設置された荷重の履歴を検討する. 写真-6 は, 図-8 の赤線部を E1 から B4 杭の方向に撮影している. 発掘に携わった人の位置が杭のそれに対応している. C と D 列杭の間は約 6 m あり, この領域の土に残る荷重履歴の検討が本節の焦点になる.

写真-7 は使用した土壤硬度計 (DIS-5553) である. コーンに接続されたコイルバネは, コーンを土中に貫入する際の荷重に比例して圧縮し, 40mm の縮量に対して $78.4 \pm 2.0\text{N}$ の荷重となる. 簡易的な抵抗値は, 平らに削った土表面に先端コーンを押し込むことにより測定する. 図-34 は, 土壤硬度計の測定位置を示している. 図中の×が測定

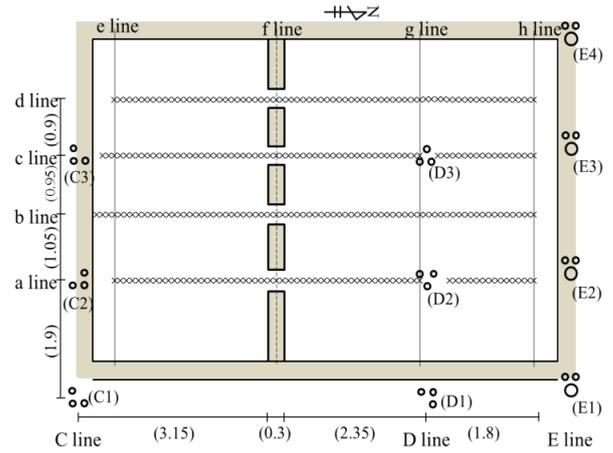


図-34 土壤硬度計の測定位置

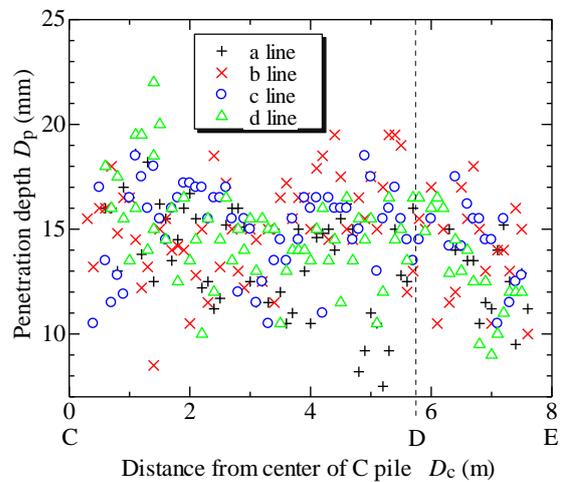


図-35 D_{pc} と D_c の関係 (a~d 測線:全測定値)

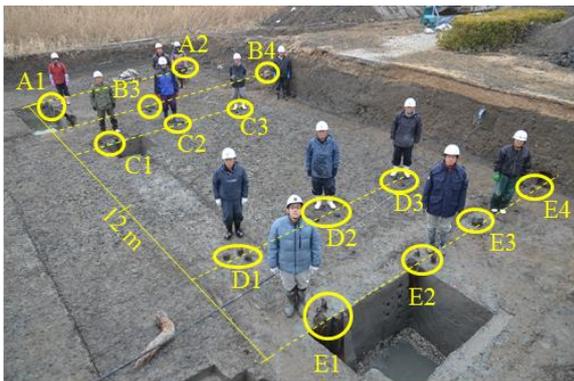


写真-6 木杭の位置 (図-8 の赤線部)



写真-7 土壤硬度計 (DIS-5553)

点であり, a~d 列線上で 10 cm 間隔に測定した. 測定値の精度を高めるために, 図-34 の白色部を事前に 10 cm 程度掘削して測定面を整形している.

図-35 は, 土壤硬度計の貫入深度 D_{pc} を C 列杭からの距離 D_c に対してプロットしている. a, b, c, d の測線上の D_{pc} を, それぞれ記号を変えて区別しているが, d 測線上の $D_c=1 \sim 1.5\text{m}$ の値が大きく, D と E 杭間の D_{pc} が C と D 間のそれらより小さいのが特徴的である. 図-36 は, 図-34 に示す a~d の測線上の D_{pc} を D_c に対してプロットしている. 各測線上の D_{pc} を詳細に検討するため, C, D, E 杭間の D_{pc} 値の傾向が異なる領域で区分して, その領域内の D_{pc} の平均値 \bar{D}_{pc} を図中に () で示した. 例えば, d 測線上は $D_c=1.7\text{m}$ を境に C と D 杭間で傾向が異なるので 2 つに区分して, $\bar{D}_{pc}=17.1$ と 14.2mm としている. 表-4 は, それらの D_{pc} の統計量をまとめており, $n, s, V/D_{pc}$ は, それぞれ測定個数, 標準偏差, 変動係数である. D と E 間の D_{pc} は, C と D 間の直近のそれより, a, b, c, d の測線に対して, それぞれ 0.3, 2.4, 0.6, 1.2 mm 小さく,

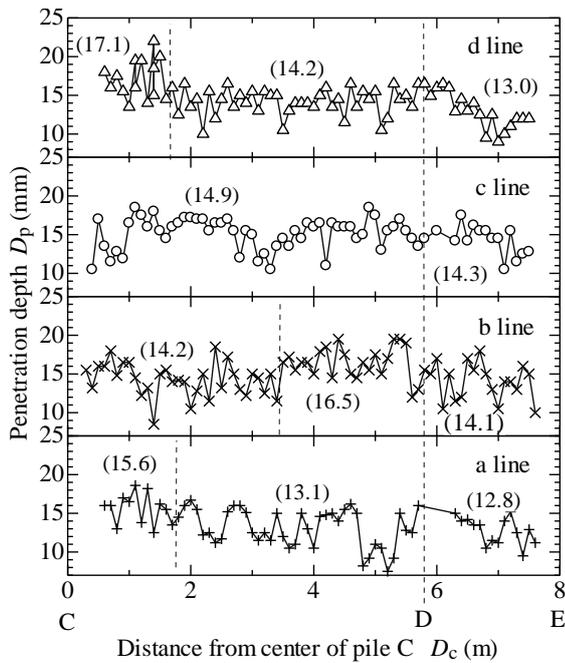


図-36 D_{pc} と D_c の関係 (a~d 測線)

表-4 各測線上の D_p の統計量

Line	n	D_{pc} (mm)	s	VD_{pc} (%)
a	12	15.6	1.9	12.2
	40	13.1	2.4	18.3
	14	12.8	1.7	13.2
b	32	14.2	2.1	14.9
	23	16.5	2.0	12.1
	19	14.1	2.3	16.2
c	54	14.9	2.0	13.4
	15	14.3	1.8	12.4
d	14	17.1	2.5	14.5
	41	14.2	1.7	11.9
	18	13.0	2.3	17.5

d 測線上の $D_c < 1.7$ m の D_{pc} は $D_c > 1.7$ m のそれより 2.9 mm 大きい。 D_{pc} 値が大きいと大きな荷重により土の強度が増したことを意味するが、 D_{pc} の差を荷重の差に換算することは今後の課題である。 b と d 測線上においては、 D と E 杭間の表層地盤の強度は、 C と D 杭のそれより小さく、 C と D 間で大きな荷重を受けていたと予想される。 しかし、両者の差は大きくはない。 加えて、 C と D 杭の間 ($D_c \approx 3$ m) で D_{pc} が大きい傾向はないので、基礎石の存在や他より大きな荷重を受けた痕跡は認められない。 VD_{pc} の観点からも、この領域の D_{pc} の変動に特徴的な差はない。

図-37 は、図-34 に示す e, f, g, h 列上で a, b, c, d 列と交わる点の D_{pc} をプロットしている。 e

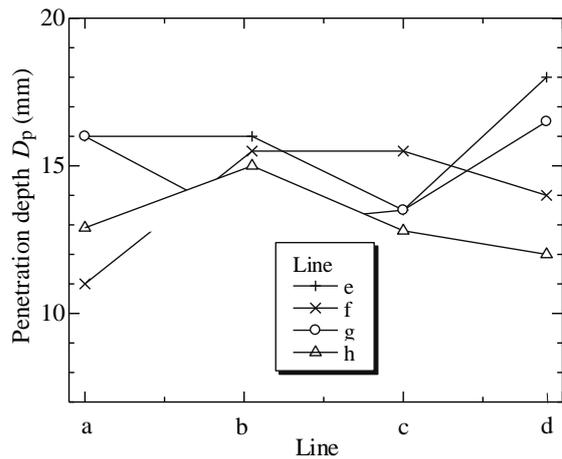


図-37 a, b, c, d 測線と交差する a~d 測線上の D_{pc} 値

(+)列の d 列上の値が 18 mm と大きいのは、図-35 と 36 で述べたことと整合するが、 C と D 杭の間に位置する f (×)列の D_{pc} が他のそれらと同等であることから、 f 列上で基礎石の存在や地表面に有効土被圧を超える荷重を受けた痕跡は、やはり認められない。 C と D 杭は牡蠣密集層への打込杭である^{34), 36)}ので建物やそれを介する荷重は、これらの杭によって支持されたと判断するのが自然である。 A と E 列杭周辺で測定されたポータブルコーン貫入試験による非排水強度が 8~16 kN/m² と同等であった³⁹⁾こともこの判断を支持する。

6.6 結論

SBD では、世界遺産の遺跡調査として、砂質土層に対しては無水掘りによるオールコアが必要であった。 このためのケーシングパイプ径は 86 mm が用いられたが、その下層の粘性土の採取は倍圧サンプラー⁴⁰⁾によって同じボーリング孔内で行われた。 オールコアとチューブサンプリングは、別孔で行うのが通常であることを考えると、調査費用の低減と時間の短縮効果は極めて大きい。

本節の他の主要な結論は、以下のように要約される。

- 1) 遺構杭の周面から任意の距離 D_p で、鉛直方向に測定したポータブルコーン貫入試験 PCPT から得た非排水強度 a_u は、杉杭で杭直径 ($d=20$ cm) の 2.5 倍、松の群杭 ($d=40$ cm) で 1.25 倍の範囲で、杭打設の影響のない a_u のそれぞれ 2.5 倍、2 倍程度であった。
- 2) 杉杭打設による周辺地盤の影響範囲は、杭のトレンチ内で行った水平方向の PCPT や含水比 w_n の変化^{33), 34), 36)}と同様であり、川崎粘土を用いた

モデル試験結果とも整合した。これらの結果は、杉杭が打込み杭である結果^{33), 34), 36)}を補強した。また、木杭審議会(Timber Piling Council)⁴²⁾や Commings ら⁴³⁾の見解とも一致した。

- 3) 杭打設後約 160 年を経ても、打設直後の地盤の攪乱や過剰間隙水圧の消散に起因する地盤の強度特性、 m_0 の変化や打設の影響範囲は、間隙水圧消散後は大きな変化がないと判断された。
- 4) D と E 杭間の表層地盤の土壌硬度計の貫入深度が C と D 杭のそれより小さく、C と D 間で大きな荷重を受けた可能性がある。しかし、両者の測定値の差が小さく、基礎石の存在や地表面に有効土被圧を超える荷重を受けた痕跡は、認められなかった。

7. おわりに

土木遺産は、地域の中の当該位置、地形、地質、地盤、地政学的な環境等を踏まえ、そこに住む人々の営みや生活環境・生活文化を映す歴史的建造物である。国指定や世界遺産化によって、文化財としての存在を地域の活性化として有効活用することも期待されている。横浜ドライドックは、その成功例であり、国内では初めての保存・活用型の重要文化財である。年間 2,500 万人が訪れるこの遺産は、活用を図りながら土木建造物の保存を行った先駆的な重文で、従来の文化財の概念を大きく変えた事例である⁴⁴⁾。

一方、地震時の地盤災害によって、存在が脅かされている文化財も存在している。考古学・歴史学・交通工学・景観学・植物学に加え、当該文化財を所掌する行政担当者が会する保存・修理の委員会に土木工学の専門家として著者も参加した委員会があった。当該文化財の下層地盤には、飽和した沖積砂層が存在し、地震時の液状化や流動化が懸念されるが、地盤工学的な検討に他の分野の委員や文化財行政の担当者の理解を得るのが困難であった。『文化財の保存・修理は、下層地盤の工学的な健全性の担保の上に成立する。』との著者の見解が、予算や工期の前にかき消される状況であった。文化財行政のみならず、地盤工学にとっても一つの試金石のような事例であった。

また、古墳や遺跡調査に参加する地盤工学者が、地盤工学的手法をその調査に持ち込むために、歴史学者や考古学者、行政側等の理解が得られない嘆き話をよく耳にする。我が国に地盤工学が根付いて、ようやく 60 年を過ぎたところである。以上の事例は、地盤工学は、遺跡の保存・修復にお

いて、歴史学や考古学に比べて新参者であり、地盤工学者の地道な努力が今後も一層求められていると理解すべきかもしれない⁴⁵⁾。

歴史は伝承するだけでなく、目に見える形で残すことが大切である。特に土木遺産は、生活環境や技術、生活文化を担ってきたものである。また、潜在的に多くの市民の興味の中にあるのも事実である。横須賀市や富津市が主催した歴史遺産の講演会に、それぞれ 250 名を超える一般市民が参加された⁴⁶⁾のは驚きであった。地盤に関する専門学会として、人類共通の遺産を健全に保全して、次世代に継承していくための責務は重い。また、これらを積極的に発信していく努力も必要である。

明治期に国策として導入した欧米からの技術移転は、我が国の近代化に不可欠であった。一方、当時の地業に対する設計思想や技術力の水準の高さが、海外からの技術移転を支えた側面も見逃せない。建屋を含む構造物を維持する合理的な基礎工法や設計思想が、各々の事例に応じて適切に施されている^{47), 48), 49), 50)}からである。三重津海軍所のドックの巧みな木組み構造もその範疇⁵¹⁾に含まれる。

性能照査法の開発と進展は、通常の調査・試験・設計・施工の進展のみならず、文化財調査や地盤災害の調査やメカニズムの解明⁵²⁾にも不可欠である。一方、土木史跡においては、設計等によって新たな施設の構築等を行うことは少ないので、現状の史跡の保存・修復が中心となる。したがって、土木史跡に対する性能設計に関しては、性能照査法の精度と適用性の検討を積み上げることにより、文化財としての性質や特徴等の個々の事例の中で真実性 (Authenticity) の議論を含めて、実態把握等の精度を高めることが重要と考えている。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤調査・試験法の小型・高精度化と設計への適用，小特集，地盤工学会誌，Vol.54, No.8, pp.1-31, 2006.
- 2) 近藤悦吉・向谷彦・梅崎健夫・中野義仁：最近の地盤調査・試験法の適用性—軟弱地盤上の盛土構築を例示して—，地盤工学会誌，Vol.54, No.8, pp.29-31, 2006.
- 3) 諏訪靖二：建築紛争と地盤工学—事例に基づく課題分析—，第 43 回地盤工学研究発表会，pp.89-90, 2008.
- 4) 正垣孝晴：性能設計のための地盤工学—地盤調査・試験・設計・維持管理まで—，鹿島出版会，342p, 2012.
- 5) Shogaki, T., and Madarame, N. (2018): Strength and deformation properties around pile driven to clay deposit, *Proc. of ICOFORT International Conference in Hikone*,

- pp.1-10.
- 6) 地盤工学会, JGS 4001-2004, 性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則, 185p, 2006.
 - 7) 社団法人日本港湾協会, 国土交通省港湾局監修, 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
 - 8) 本城勇介, 地盤構造物の設計論と設計コード, 第39回地盤工学会研究発表会 展望講演, 144p, 2004.
 - 9) 正垣孝晴・中野義仁: コーン機能を有する小径倍圧型水圧ピストンサンブラーで採取した試料の品質, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.364-375.
 - 10) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 固定ピストン式シンウォールサンブラーによる土試料の採取 (JGS1221-2003), pp. 194-200.
 - 11) Eurocode 7 (1999): Geotechnical design Part 3, Design assisted by field-testing, *ENV 1997-3*, pp. 94-101.
 - 12) ISO22475-1 (2006): Geotechnical investigation and testing/sampling –Sampling methods and groundwater measurements, Part 1: *Technical principles for execution*, pp. 1-28.
 - 13) 小林正樹・松本一明・堀江宏保: 乱さない粘土試料の品質に及ぼす調査者の影響, 土質工学における確率統計の応用に関するシンポジウム論文集, pp.1-4, 1982.
 - 14) 松尾稔・正垣孝晴: 土質調査実施者やその手順の差が試験結果に与える影響の統計的分析, 土質工学における確率統計の応用に関するシンポジウム論文集, pp.5-12, 1982.
 - 15) Matsuo, M. and Shogaki, T. (1993): Evaluation of undrained strength of unsaturated soils by plate uplift test, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.1, pp.1-10.
 - 16) 松尾稔・正垣孝晴: 一面せん断試験による強度の推定誤差が信頼性設計結果に与える影響, 土と基礎, Vol.36, No.12, pp.43-47, 1988.
 - 17) 電気学会編, 送電用支持物設計標準 (JEC-127), 電気規格調査会, pp.136-146, 1979.
 - 18) 大津宏康: リスク工学と地盤工学, 土と基礎, Vol.52, No.7, pp.27-34, 2004.
 - 19) 松尾稔・正垣孝晴: q_u 値に影響する数種の攪乱要因の分析, 土質工学会論文報告集, Vol.24, No.3, pp.139-150, 1984.
 - 20) 正垣孝晴・日下部治: 地盤データのばらつきの原因と一次処理, 土と基礎, Vol.35, No.1, pp.73-81, 1987.
 - 21) Shogaki, T. and Maruyama, Y. (1998): Estimation of *in-situ* undrained shear strength using disturbed samples within thin-walled samplers, *Geotechnical site characterization*, Balkema, pp.419-424.
 - 22) Shogaki, T. (2006): An improved method for estimating *in-situ* undrained shear strength of natural deposits, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.2, pp.109-121.
 - 23) Shogaki, T., Nochikawa, Y., Jeong, G. H., Suwa, S. and Kitada, N. (2005): Strength and consolidation properties of Busan new port clays, *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 1, pp. 153-169.
 - 24) 正垣孝晴・蛭崎大介・菅野康範・中野義仁・北田奈緒子: ピサの斜塔下の粘性土の地盤工学的性質, 地盤工学会誌, Vol.53, No.3, pp.27-29, 2005.
 - 25) 地盤工学会: サクシオン測定を伴う一軸圧縮試験マニュアル, 最近の地盤調査・試験法と設計・施工への適用に関するシンポジウム論文集, pp. 付1-14, 2006.
 - 26) Shogaki, T. and Kumagai, N. (2008): A slope stability analysis considering undrained strength anisotropy of natural clay deposits, *Soils and Foundations*, Vol.48, No.6, pp.805-819.
 - 27) Nakase, A. (1967): The $\phi_u=0$ analysis of stability and unconfined compression strength, *Soils and Foundations*, Vol. 7, No.2, pp.35-50.
 - 28) Matsuo, M. and Asaoka, A. (1976): A statistical study on conventional safety factor method, *Soils and Foundations*, Vol. 16, No.1, pp.75-89.
 - 29) 正垣孝晴・高橋章・熊谷尚久: 既設アースダム堤体の耐震性能評価法—レベル1地震動を想定して—, 地盤工学会誌, Vol.56, No.2, pp.24-26, 2008.
 - 30) 国土交通省関東地方整備局 東京空港整備事務所, D滑走路技術記録, 2010.
 - 31) Mietsu Naval Facility (MNF, 2018). <http://mietsu-ekaiisan.jp/>
 - 32) 佐賀県立図書館蔵郷土 1058, 「三重津御船屋絵図」; 安政 2~4 年(1855~1857)頃と考えられる三重津船屋.
 - 33) Shogaki, T. and Okuda, D. (2018): Load history off cedar foundation pile in the Mietsu Naval Facility World Heritage, *Proceeding of the 1st International Conference on Press- in Engineering 2018*, Kochi, pp.1-8.
 - 34) Shogaki, T., Okuda, D. (2018): Deformation behavior around foundation piles in Hasuik clay deposits: Model tests on Kawasaki clay, *GTISA 2018*, pp.1-8.
 - 35) Shogaki, T. (2017). Mechanism of sample disturbance caused by tube penetration (Model test on Toyoura sand). *Soils and Foundations*, 57 (3), 527-542.
 - 36) Shogaki, T., Okuda, D. (2018): Deformation behavior around foundation piles in the Mietsu Naval Facility World Heritage Site: Model tests on Kawasaki clay, *16th ARC*, 2018, pp.1-4.
 - 37) Matthews, D. (2006): Timber piles, A brief overview, Timber Piling Council, *Piling Products, Inc.*, pp. 12-20.
 - 38) Chellis, R. D. (1951): Pile foundations Theory-Design-Practice, *McGraw-Hill*, pp. 296-298.
 - 39) Shogaki, T. Okuda D. and Suzuki, N. (2018): Geotechnical interpretation of the mietsu dry dock World Heritage Site, *Proceeding of the 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp.525-529.

- 40) Shogaki, T (1997) : A small diameter sampler with a two-chambered hydraulic piston and the quality of its samples, *Proc. 14th ICSMFE*, Hamburg, pp. 201-204.
- 41) Shogaki, T (1997) : Strength properties of clay by portable unconfined compression apparatus, *Proc. of the Conf. Geotechnical. Engineering for Coastal Development*, pp. 85-88.
- 42) Timber Piling Council (2016) :Timber pile design and Construction manual, *Southern Pressure Treaters' Association*, p. 24.
- 43) Cummings, A. E., Kerkhoff, G. O., and Peck, R. B. (1948) : Effect of driving piles in soft clay, *Proc. ASCE*, Vol. 74, pp. 1553-1563.
- 44) 伊藤孝：日本の近代化遺産－新しい文化財と地域の活性化－, 岩波新書 605, 249p, 2000.
- 45) 正垣孝晴：近代日本の土木遺産の地盤工学的分析と保存, 地盤工学会誌, Vol.61, No.5, pp.1-5, 2014.
- 46) <http://jibankantou.jp/group/rekishisan2.html> ((公社) 地盤工学会「関東支部歴史遺産の地盤工学研究に関する研究委員会」の講演会報告) .
- 47) Shogaki, T (2016). Identification and *in situ* dynamic strength properties of 3rd Meiji fortress reclaimed sands, *Soils and Foundations*, 56 (5), 931-942.
- 48) 正垣孝晴, 中川原雄太：白壁兵舎の基礎構造と建物の変形, 第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会 III-39, pp.1-4, CDR, 2016.
- 49) 正垣孝晴, 中川原雄太, 藤井幸泰：富岡製糸場西置繭所の基礎と建物の変形, 地盤工学ジャーナル, 第 10 巻 第 4 号, pp.559-567, 2015.
- 50) Shogaki, T, Fujii, Y., and Nakagawara, Y. (2018): Deformation of the Tomioka Silk Mill's East cocoon Warehouse foundation and structure, *Soils and Foundations*, accepted.
- 51) 正垣孝晴・奥田大史・中野義仁・鈴木直文：三重津海軍所ドライドック渠口西側部の渠壁構造と施工時の安定性, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.47-48, 2017.
- 52) 正垣孝晴：技術者に必要な地盤災害と対策の知識, 鹿島出版会, 148p, 2013.
- c : 粘着力
 - c_u : 非排水せん断強さ
 - $c_{u(1)}$: $\sigma_{p(1)}$ 下の原位置の非排水強度
 - $c_{u(CPT)}$: $N_{kt}=10$ から得た非排水強度
 - C_t : 総費用
 - $C_{t(min)}$: C_t の最小値
 - C 列杭 : SBD の C 列杭
 - d : 供試体直径
 - D_t : 根入れ深さ
 - D 列杭 : SBD の D 列杭
 - D_p : 杭表面からの距離
 - $D_{p(max)}$: 杭表面からの最大距離
 - D_{pc} : 土壌計の貫入値
 - E : 標高
 - E 列杭 : SBD の E 列杭
 - E_{50} : 変形係数
 - h : 供試体高さ
 - I_p : 塑性指数
 - ISO : 国際標準化機構
 - JGS : 地盤工学会基準
 - K_0CUC : K_0 圧密非排水圧縮試験
 - LCC : ライフサイクルコスト
 - MNF : 三重津海軍所
 - n : 供試体数
 - N : N 値
 - N_{kt} : コーン貫入試験のコーン係数
 - P_t : 破壊確率
 - PV : 現在価値
 - PCPT : ポータブルコーン貫入試験
 - p_m : 平均圧密圧力
 - q_c : コーン貫入抵抗
 - q_u : 一軸圧縮強さ
 - $q_{u(1)}$: 従来法で推定した原位置の非排水強度
 - $q_{u(1)^*}$: 簡便法で推定した原位置の非排水強度
 - R_{cu} : 非排水せん断強さの比
 - s : 標準偏差
 - SBD : 船屋地区
 - S_0 : サクシヨン
 - TBT : 貿易の技術的障壁
 - T.P. : 東京湾平均海面
 - TS : チューブサンプリング
 - w_n : 自然含水比
 - WTO : 世界貿易機構
 - VD_{pc} : D_{pc} の変動係数
 - z : 深度
 - ρ_t : 湿潤密度
 - ϕ : 内部摩擦角
 - $\sigma_{p(1)}$: K_0CUC から得た原位置の圧密降伏応力

記号説明

- A 列杭 : SBD の A 列杭
- B : 基礎幅
- Bor.6 : ボアホール 6
- Bor.7 : ボアホール 7
- B 列杭 : SBD の B 列杭

岩石の風化・鉱化現象と微生物

— 琉球石灰岩と八重山砂岩の露頭調査を例として —

松原 仁¹⁾・大城 勇人²⁾・崎山 浩考²⁾

1) 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース

2) 琉球大学大学院理工学研究科環境建設工学専攻

1. はじめに

‘Since their origin, perhaps some 4 billion years ago, microorganisms have had a profound influence shaping our planet’ (Konhauser, 2007). これは、地球生物学分野を牽引しているKurt O. Konhauser教授(アルバータ大学, カナダ)の著書“Introduction to Geomicrobiology”の冒頭の一文である。生命が地球に誕生して以来、岩石をその生息地として選んだ微生物が、岩石の形や性質に少なからず影響を与えながら生き延びてきたことを明確に表した一文である。特に、岩石表面や内部に生息している微生物(以後、岩内微生物と称す)の代謝反応が、岩石の風化現象に大きな影響を及ぼしていることは(Büdel, et al., 2004)、地質材料の変化の予測や維持管理を扱う地質工学においても重要な現象の一つであろう。例えば、アドリア海沿岸部(スロベニア)における海岸線の風化後退現象に関しては、岩内微生物が $2 \text{ kg/m}^2/\text{年}$ にも及ぶ岩石風化に関連していると推察されており(Schneider and Le Campion-Alsumard, 1999)、岩内微生物の活動を調査し、研究することは、地盤や岩盤の安定性を議論する上で不可欠と言える。

岩内微生物は、岩石中の鉱物表面や内部に付着し、岩石内部から直接的にエネルギーや栄養源を獲得しながら生息しており(Konhauser, 2007)、生息形態に応じて以下の3つに分類することができる。

- ① Chasmoendolithic bacteria
- ② Cryptoendolithic bacteria
- ③ Euendolithic bacteria

①は岩石の亀裂や割れ目表面に付着、②は岩石内部の空隙に付着、③は岩石内部に穿孔しながら、生息していると考えられている(Schneider and Le Campion-Alsumard, 1999)。すなわち、岩内微生物は岩石の表面や内部を問わず侵食し、地殻の風化を確実に進行させる。これは、岩内微生物が岩石の微視的構造を破壊し、強度低下や剛性低下等の力学的な特性そのものに影響を及ぼしていることに他ならない。したがって、岩内微生物の活動自体が岩盤の脆弱化を誘発しているとも考えられるのである。当然ではあるが、岩内微生物による岩石風

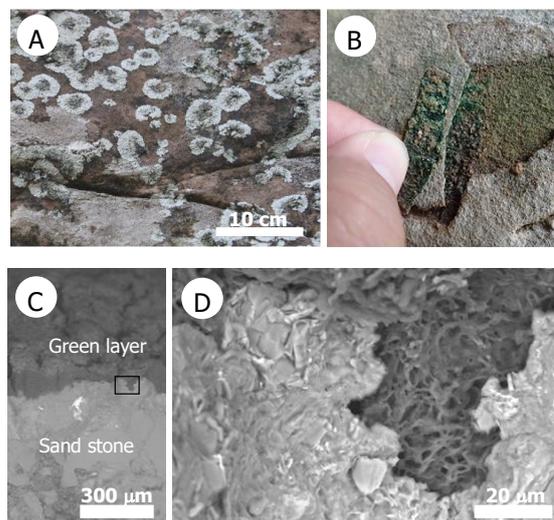


図1 砂岩表面に生息する地衣類(A:表面, B:表面剥離を促すように生息する緑藻・藍藻, C:緑層のSEM画像, D:Cの四角部分の拡大SEM画像)

化現象は我が国でも散見される。

一方、石灰岩のような炭酸塩岩に生息している微生物はコロニー周辺の環境をアルカリ化させ、炭酸塩鉱物の析出を誘発することが知られている(幸村・長沼, 2004; Oshiro and Matsubara, 2018)。すなわち、岩内微生物は岩石風化を誘発する一方で、岩石の鉱化作用にも大きな役割を果たしているのである。このような微生物の代謝反応に誘発された炭酸塩鉱物の析出現象に関しては、実地盤において効率的に作用する環境を人工的に創り出す研究も進められており(DeJong, et al., 2006; DeJong, et al., 2010; Danjo and Kawasaki, 2016)、次世代型の地盤改良工法としても期待されている。

本稿では、琉球諸島にある琉球石灰岩と八重山砂岩に生息している岩内微生物と地質工学との関連性について、岩石の風化・鉱化という観点から考察する。なお、本稿は岩崎ら(2017)、Oshiro and Matsubara (2018)およびSakiyama and Matsubara (2018)を同時に構成し、その概要をまとめたものである。

2. 砂岩表面に生息する岩内微生物

図1は琉球諸島西表島で見られる砂岩表層の一

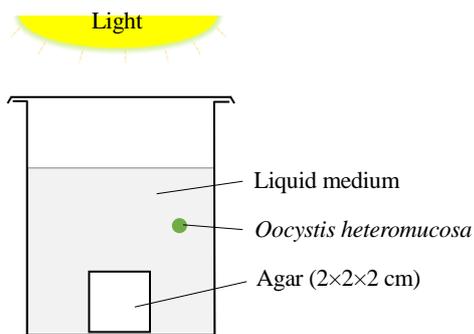


図2 寒天試料を用いた緑藻 (*Oocystis heteromucosa*) の穿孔実験

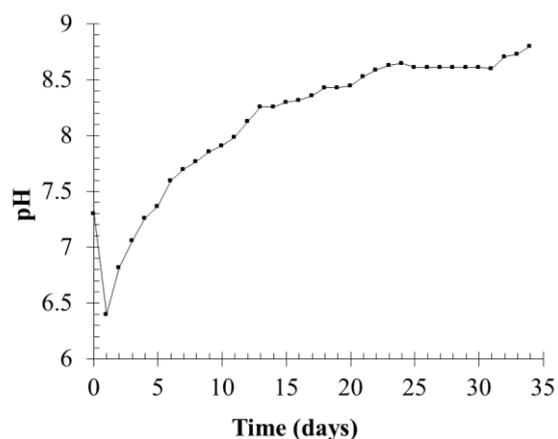


図3 培養時間と pH の関係

例であり、地衣類が岩石全体を覆っている様子を観察することができる。同図からは、砂岩表面では地衣類に共生している緑藻やシアノバクテリア（藍藻類）が岩石を表面から穿っているばかりでなく、岩石内部にもコロニーを蔓延らせながら蝕んでいることが示唆される。

西表島の露頭砂岩では、このような岩内微生物に起因すると考えられる風化形態（剥離面）を多く見ることができる。剥離面では多くのバイオマットが観察されたことから（図1(B)）、岩内微生物が岩石内部に侵入しバイオマットを形成した後に、砂岩表層を風化させ、剥離層が形成したと考えられた。そこで、本節では、岩内微生物の岩石への侵入現象を確認するために、岩石を模擬した寒天試料を用いた室内実験例（岩崎ら, 2017）を紹介する。

西表島で発見したバイオマットは、砂岩表層直下に形成されている。ここでは、図2に示すように、岩石に見立てた固体状の寒天（2×2×2 cm³）を液体培地（peptone: 0.0005 Wt%, yeast extract: 0.001 Wt%, water: 100 ml）に入れ、沖縄県内の岩石から単離した緑藻 (*Oocystis heteromucosa*) の動態観察を試みる。なお、緑藻の光合成を促すために、実

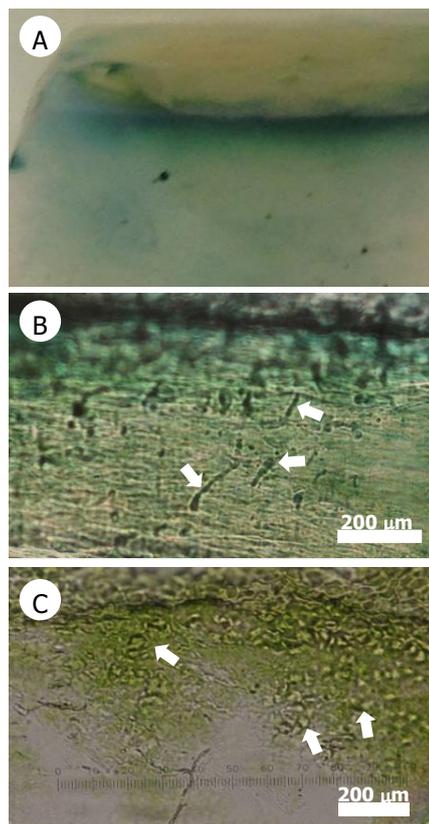


図4 実験開始後 35 日後の寒天表層の様子 (A : 寒天表面, B, C : 寒天表層断面の様子 (B : 管状構造, C : 粒状構造))

験体上部には常時光源を設置し（図2参照）、室温は25℃とした。

図3に、時間と液体培地のpHの関係を示す。同図より、pHは初期の7.3から8.8まで上昇しており、これは、*Oocystis heteromucosa*の光合成活動に伴うバイオアルカリ化によるものと考察することができる。なお、pHの値は、砂岩で一般的に観察される珪酸塩鉱物を溶解する領域には達していないが、上昇傾向にあることから、溶解域まで上昇する可能性は十分にあると考えられる。

次に、寒天の内部に着目する。図4は緑色に変色した寒天表層とその微細構造を示したものである。同図より、*Oocystis heteromucosa*は、寒天表面付近に形成されたバイオマットを通じて寒天内部へ穿孔していることが分かる。また、管状または粒状の微細構造を呈しながら穿孔していることを観察することができる（図4(B), (C)）。このような微細構造は、多くの岩石中にも存在することが知られており（Furnes, et al., 2001; Cockel and Herrera, 2008; Fisk and McLoughlin, 2013）、本実験によって、岩石中の微生物の挙動をうまく模擬できていると考えられた。なお、寒天モデルに栄養源を加えなかった場合には、このような穿孔形態を確認する



図5 湧水が見られる石灰岩露頭（沖縄島）

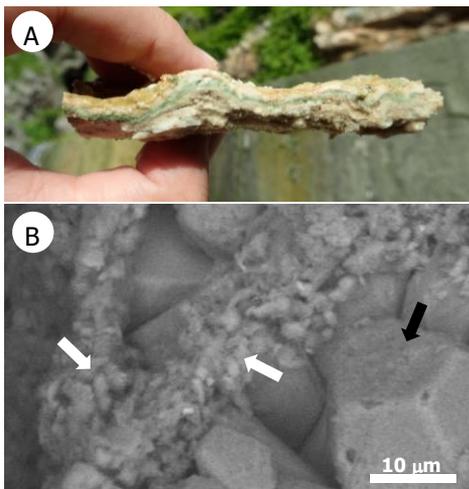


図6 若齢石灰岩中の緑色層：シアノバクテリアを主体とする光合成微生物の群衆（A：外観，B：微細構造（白矢印：EPS内部の方解石微結晶，黒矢印：方解石の結晶））

ことができなかつたことから、緑藻は栄養源を摂取するために寒天内部へ穿孔したと考えられた。

3. 若齢石灰岩に生息する岩内微生物

図5は沖縄島南部にある石灰岩の露頭である。地下ダム（2007年に完成）の止水壁から約180mの位置にある本露頭では、止水壁を越流または浸透してきた地下水が湧出している。地下ダムは、琉球石灰岩層の地下水盆に地下水を貯水しているため、露頭から湧出している水（ $pH \approx 7.7$ ）には多くの炭酸カルシウムが溶解している。本節では、岩内微生物の代謝反応に誘発されて形成されたと考えられる若齢石灰岩について紹介する（Oshiro and Matsubara, 2018）。

本露頭付近には、いくつかの若齢石灰岩が生成されており、その内部では白色と褐色を繰り返す縞状構造が見られ、表面下2~4 mmの位置には、図6(A)に示すような緑色層が発達していた。緑色層においては、岩内微生物のバイオフィームと考えら

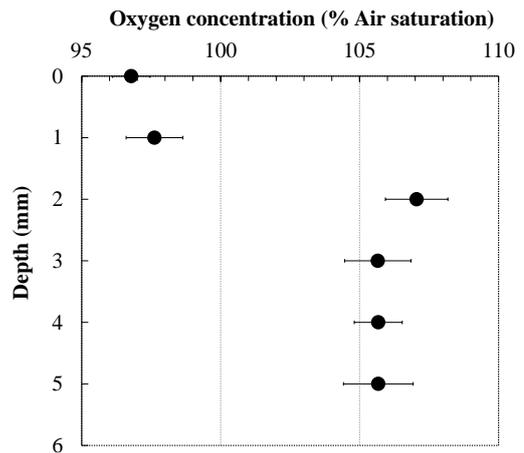


図7 石灰岩の表層からの深さと酸素濃度の関係

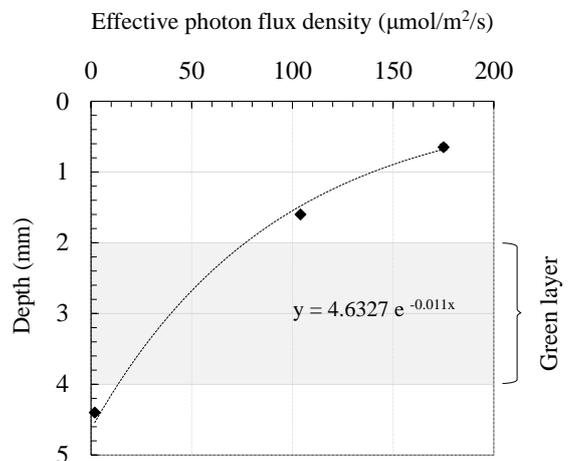


図8 石灰岩の表層からの深さと光量子密度の関係

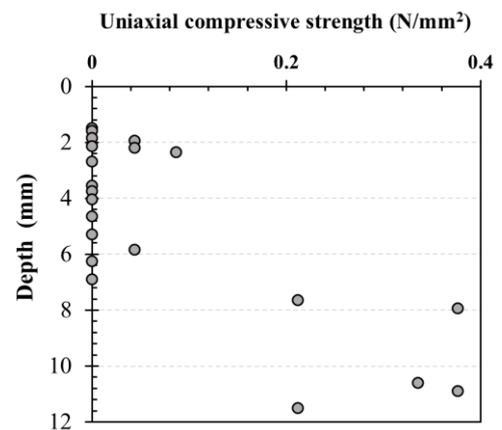


図9 石灰岩の表層からの深さと一軸圧縮強度（針貫入試験による換算値）の関係

れる糸状の組織が鉱物粒子に絡みつくように形成されていた。また、複雑なネットワーク状に見えるこのようなバイオフィームの内部においても、炭酸カルシウムの微粒子が形成されていた（図6(B））。

図7は岩石表面から5 mmの位置までの酸素濃度を、酸素マイクロセンサーで1 mm間隔で計測した結果を示している。表面下2 mm以深では、酸素濃度が過飽和状態になっており、その付近で酸素が生成されていることが示唆される。また、図8に示しているように、光合成に有効な光量子が緑層付近にまで到達していることが確認されたことから、本緑色層では、葉緑素をもつ緑藻やシアノバクテリアが光合成をしながら生息していることが考えられた。なお、緑藻類やシアノバクテリア等の緑色系の微生物は、波長が約435nmと約680nm付近の光を吸収することが知られており、本緑色層においてもこの波長の範囲にある光を確認している。

一般に、淡水成の石灰岩における縞状構造の形成は、方解石の水温変化に対応した季節的な沈殿速度変化に起因すると考えられている(川合・狩野, 2007)。したがって、本露頭で見られた若齢石灰岩の形成には、当然ながら季節変化に伴う化学的な鉱化現象も考えられるが、酸素濃度の深さ方向に対する変化から岩内微生物の代謝反応も多分に関係していると推察された。

図9は、表面下12 mmまでの位置における一軸圧縮強度(針貫入試験による換算値)を示している。興味深いことに、緑色層以深から急激な強度増加が認められる。また、SEM EDS解析により、緑色層以深では合成カルサイトが多数見つかったことから、緑色層以浅では化学的、あるいは微生物に誘発されて方解石や方解石の微結晶が形成され、緑色層以深ではそれらが再結晶化することで強度が発現したと考えられた。

以上のことより、湧水が見られる露頭石灰岩においては、岩内微生物に誘発された石灰岩の鉱化現象が認められ、岩石の強度が増加することが分かった。琉球諸島におけるこの生物学的な現象が、約10年の歳月を以って岩盤表面の強度へ影響を及ぼし得ることが示されたことは地質工学的にも興味深い。

4. 石灰岩と砂岩の不整合面で見られる風化形態

2節と3節では、それぞれ琉球諸島における砂岩と石灰岩表層における岩内微生物の挙動について紹介した。ここでは、砂岩と石灰岩の不整合面で見られる特異な柱状構造と岩内微生物の関係について述べる(Sakiyama and Matsubara, 2018)。

図10は、南西諸島西表島で発見した岩塊崩壊の例である。本層では、砂岩と石灰岩が不整合に堆積しており、不整合面を堺にした複数の岩塊崩落が見られる(図10(A), (C))。同図より、これらの岩塊崩落は、不整合面で発達している柱状の領域

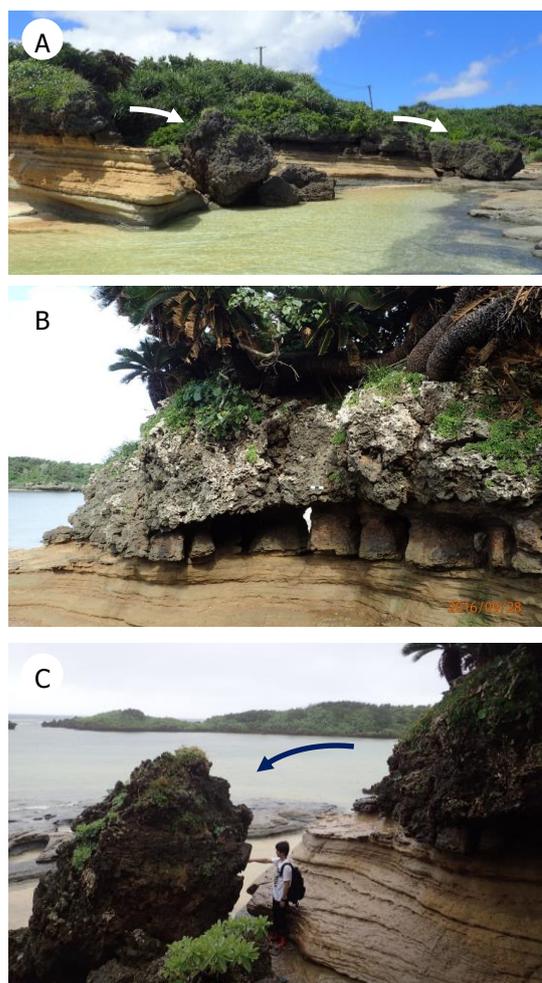


図10 琉球石灰岩と砂岩の不整合面の風化に伴う岩塊崩落(西表島)(A, C: 岩塊崩落の様子, B: 不整合面の様子)

(高さ: 30~50 cm, 直径: 20~30 cmの柱状構造を有する特殊な風化領域)を起点として発生していることが分かる。図11より、本露頭における一軸圧縮強度(シュミットハンマーを用いた打撃試験に基づく換算値)は、砂岩層では約19MPa、琉球石灰岩層では約65MPaであり、砂岩層の強度が低いことが分かる。また、同図より、石灰岩と柱状構造の境界部分の強度は、約11MPa程度であり最も低い。したがって、本露頭で見られた岩塊崩落は石灰岩と柱状構造の境界領域における強度低下が原因であると考えられた。

一方、柱状構造の一軸圧縮強度は約60MPaにも達しており、琉球石灰岩と同程度の比較的高い強度を有していることが分かる(図11(B))。柱状構造を構成する岩石のX線解析(粉末X線回折)の結果、本構造を成す主な鉱物が石英とMg方解石(マグネサイトを含む方解石)であり、その内部においては、砂粒子間の間隙が方解石で充填されていたことから、本柱状構造の強度増加は化学的、あるいは

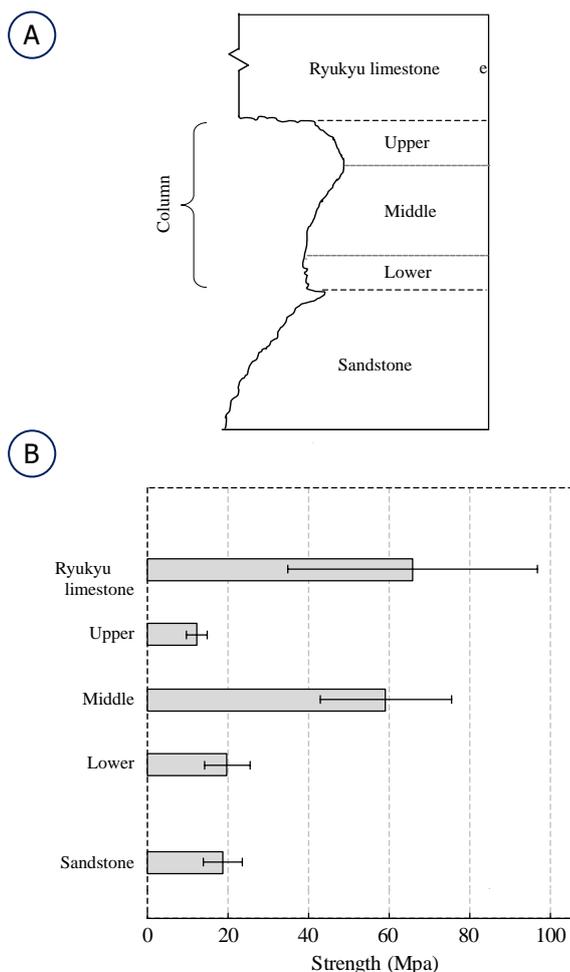


図11 石灰岩層，不整合層，砂岩層の一軸圧縮強度（シュミットハンマーを用いた打撃試験による換算値）（A：測定箇所，B：各層の一軸圧縮強度）

は生物学的なセメント作用によってもたらされたと考えられた。

一般に，地盤におけるセメント作用は，粒子の淘汰度がよく，空隙率が大きい場合に，炭酸カルシウムの染み出し液が長時間かけて拡散することにより達成されることが知られている（八木下，2015）．しかしながら，本構造においては，図12で示すような多くの微細な炭素元素が発見された．これらの元素の多くは石英粒子と方解石の境界部分に存在していた（図12(A)）．また，本構造の炭素同位体比（ $\delta^{13}C$ ）を測定したところ， -7.6‰ という値が得られた．この値は，微生物起源の岩石として知られるストロマトライトの $\delta^{13}C$ の範囲： $-13.7\sim 0.3\text{‰}$ （Oliveri, et al., 2010; Yang, et al., 2017）に一致する．したがって，本構造の成因には岩内微生物が少なからず関わっていた可能性が示唆される．特に興味深いことは，岩内微生物が岩塊崩落の起点となっている特殊な岩石構造の鉱化作用，あるいは風化作用に直接的な影響を及ぼしている

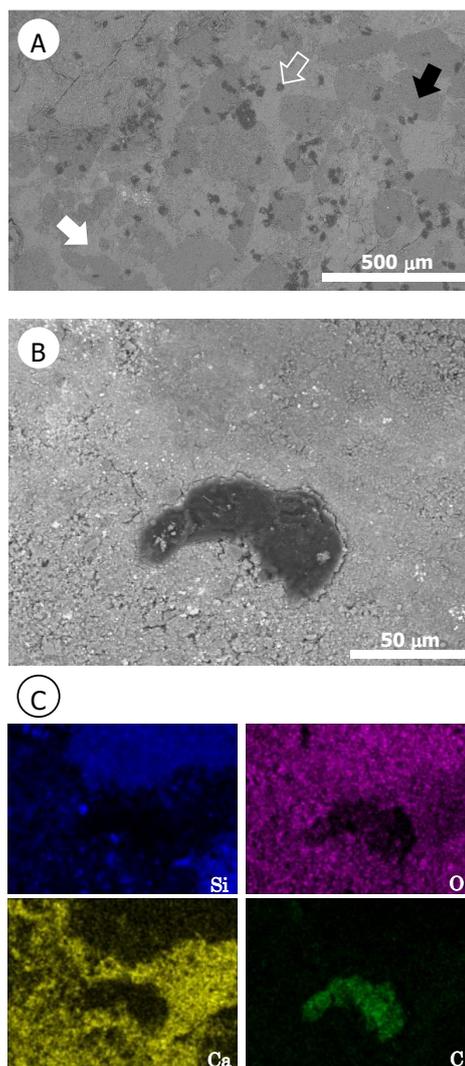


図12 不整合面で見られた炭素源の微化石（A，B：SEM画像（黒矢印：砂粒子，白矢印：間隙材，白抜矢印：炭素源），C：Bの元素マッピング（EDS））

可能性があることである．すなわち，落石や岩塊崩落などの地盤災害を考える際には，岩内微生物の影響度合いを考慮する必要性が認められる．

5. おわりに

本稿では，空間スケールが微小であるために無視されてきた岩内微生物が，琉球諸島の岩石風化や鉱化現象に深く，多分に関わっていることを示した．また，地質学的な時間スケールを要すると考えられていた微生物風化作用が，琉球諸島では数カ月から数十年の比較的短い時間スケールで発生している可能性が示唆されたことは地質工学的にも興味深いところである．

さらに，最近では，我が国で1996年に発生した豊浜トンネル岩盤崩落事故（死者20名）が，岩盤内の水分の凍結融解作用に加え，岩内微生物による岩盤侵食が多分な影響を与えていた可能性が指

摘されている (Sakurai, 2017) . ここでは, 岩盤崩落面 (凝灰岩と安山岩質水冷却砕岩との境界面) において多量の湧水が確認されており, この境界部分に多くの岩内微生物が生存していた可能性が指摘されているのである. 関与の程度は今後の研究を待たざるを得ないが, 従来の物理的・化学的な視点に生物学的な視点に加えられ, 議論を深めようという動きは注目したいところである.

現在のところ, 落石や岩塊崩落などの地盤災害と岩内微生物の関連性については, 未だ解明されていない点が多く, これらに関する研究はスタート地点に立ったと言っても過言ではない. 今後は, 「地質工学と岩内微生物」という視点に着目した精力的な研究が必要であり, 新しい地質工学として展開していく必要があると考えている.

参考文献

- 1) Banfield, J. F., Barker, W. W., Welch, S. A., and Taunton, A. (1999). Biological impact on mineral dissolution: application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(7), 3404-3411.
- 2) Büdel, B., Weber, B., Köhl, M., Pfanz, H., Sültemeyer, D., and Wessels, D. (2004). Reshaping of sandstone surfaces by cryptoendolithic cyanobacteria: bioalkalization causes chemical weathering in arid landscapes. *Geobiology*, 2(4), 261-268.
- 3) Cockell, C.S. and Herrera, A. (2008). Why are some microorganisms boring? *Trends in Microbiology*, 16(3), 101-106.
- 4) Danjo, T., and Kawasaki, S. (2016). Microbially induced sand cementation method using *Pararhodobacter* sp. strain SO1, inspired by beachrock formation mechanism. *Materials Transactions*, 57(3), 428-437.
- 5) DeJong, J. T., Fritzes, M. B., and Nüsslein, K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), 1381-1392.
- 6) DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., and Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197-210.
- 7) Furnes, H., Staudigel, H., Thorseth, I.H., Torsvik, T., Muehlenbachs, K. and Tumyr, O. (2001). Bioalteration of basaltic glass in the oceanic crust. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2(8), paper number: 2000GC000150.
- 8) Fisk, M. and McLoughlin, N. (2013). Atlas of alteration textures in volcanic glass from the ocean basins. *Geosphere*, 9(2), 317-341.
- 9) 岩崎竜馬, 廣瀬孝三郎, 崎山浩考, 松原仁 (2017) . 砂岩表面に見られる微生物による剥離状風化とその特徴, 環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 383-386.
- 10) 川合達也, 狩野彰宏 (2007) . トッフアの年縞形成と水質の関係, 日本地質学会学術大会講演要旨, 2007(0), 235-235.
- 11) Konhauser, K. O. (2007). *Introduction to geomicrobiology*. Wiley- Blackwell.
- 12) Oliveri, E., Neri, R., Bellanca, A., and Riding, R. (2010). Carbonate stromatolites from a Messinian hypersaline setting in the Caltanissetta Basin, Sicily: petrographic evidence of microbial activity and related stable isotope and rare earth element signatures. *Sedimentology*, 57(1), 142-161.
- 13) Oshiro, H. and Matsubara, H. (2018). Carbonate precipitation through photoautotrophic microorganisms at the Giza cliff in Okinawa, Japan. *Environmental Earth Sciences*, 77(16): 591.
- 14) Sakiyama, H., and Matsubara, H. (2018). Physical, chemical, and biological investigation of an unconformity between limestone and sandstone in a coastal area: Iriomote Island case study. *Catena*, 171, 136-144.
- 15) Schneider, J., and Le Campion-Alsumard, T. (1999). Construction and destruction of carbonates by marine and freshwater cyanobacteria. *European Journal of Phycology*, 34(4), 417-426.
- 16) 八木下晃司 (2015) . 堆積岩石学の概要, NSK, 85.
- 17) Yang, W., Spiro, B., Guo, Z. J., and Pentecost, A. (2017). Cenozoic lacustrine stromatolites from the southern margin of the Junggar Basin, NW China and adjacent areas: indicators for palaeoclimatic and tectonic evolution. *Geological Journal*, 52(2), 249-262.
- 18) 幸村基世, 長沼毅 (2004) . 炭酸塩岩と微生物, 環境バイオテクノロジー学会誌, 8(1), 3-7.
- 19) S. Sakurai (2017), Is the failure of rock masses caused by microorganisms?, *Proceedings of the Role of Microorganism and Thermo-Hydro-Chemico-Mechanical process in geoenvironment and geoscience*, 1, 39-42.

平成 30 年大阪北部地震 被災状況と微地形の関係

金田 朋之¹⁾・岩下 昂¹⁾・塚本 泰夫¹⁾

1) 日本物理探査株式会社 関西支店

1. はじめに

平成 30 年 6 月 18 日 (月) AM7:58, 大阪府北部を震源とした M6.1 の地震が発生した (図 1.)。朝の通勤・通学の時間帯に発生したため, NGP 関西支店でも数名が電車で閉じ込められたあと線路を歩くなど, 少なからず影響を受けた。しかし, 幸いにも, 支店社員とその家族は皆無事であった。1995 年の阪神淡路大震災 (平成 7 年兵庫県南部地震: 気象庁による命名) 以来の大きな揺れに, あらためて直下型地震の怖さを体感した。

さて, NGP 関西支店の岩下と金田で, 平成 30 年 6 月 27 日 (水) に震度 6 弱を記録した 3 地点 (茨木市, 高槻市, 枚方市) の被災状況の現地踏査を行った。これら 3 地点は, とともに震度 6 弱を記録しているが, 被災状況は地点ごとにそれぞれ異なっていた。

平成 28 年熊本地震や平成 30 年北海道胆振東部地震のような規模の大きな地震の場合は, 倒壊した家屋や激しく崩壊した山肌など, 被害の大きさを象徴する事象が大きく取り上げられている。大規模地震の場合は, あちらこちらで被害が見られるので, 微地形と地震被害との関係はよくわからない場合が多い。

この小論では, 各地区の被災箇所と微地形との関係に注目している。現地踏査の結果, 地形区分境界付近に被災箇所が集中する傾向が見られた。今回の地震は, ある程度の規模の大きさであったがゆえに, 最初に被害が発生しやすい箇所 (地形条件) をあぶりだしたものと考えている。

2. 大阪北部地震の概要と踏査箇所の選定

大阪北部地震の震源は, 大阪北部 (北緯 34.8 度, 東経 135.6 度), 深さ 13km と推定された。観測された最大震度は 6 弱。震度 6 弱は, 建物で壁や窓ガラスが破損及び落下, 耐震性の低い住宅が倒壊するなどの被害を生じる可能性があると考えられている。

大阪北部地震の被害は, 屋根瓦の落下が多く見られたことのほか, 小学校のブロック塀が社会問題化したことで記憶に残っている方もいるかと思う。



写真 1. 小学校ブロック塀の倒壊事例

現地踏査は, 気象庁の報道発表より最大震度 6 弱が観測された茨木市東中条町, 高槻市第 2 中学校周辺, 枚方市大垣内の 3 地区近辺を対象に行った。

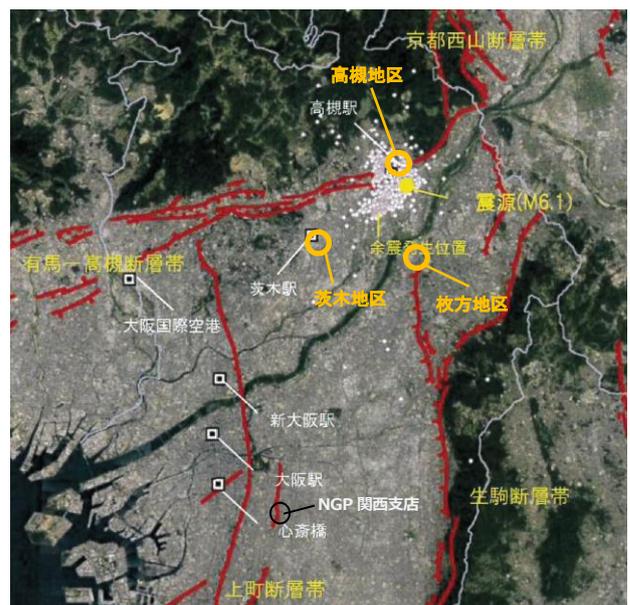


図 2. 踏査箇所案内図²⁾



図 1. 震源位置と周辺の活断層と過去の地震¹⁾

3. 地震波の特徴

大阪北部地震による地震波の特徴として、つぎの3点があげられる。

- 1) マグニチュードが M6.1 と阪神大震災（1995）などと比較して小さい。
- 2) 周期 0.2 秒～0.3 秒付近の短い周期が卓越する。
- 3) 地震の継続時間がおよそ 6 秒と短い（図 4.）。

今回の地震は、中低層住宅に被害をもたらした阪神大震災の時のような周期 1 秒から 2 秒の地震波が観測されなかった（図 3.）。家屋倒壊による死者がでなかったため、ブロック塀の倒壊や屋根瓦の落下など、過去の巨大地震災害で見落とされがちな課題に注目が集まった地震となった。

各地の被災状況もこの地震波の特徴を反映した様子が確認できた。以下、地区毎に被害状況を整理する。

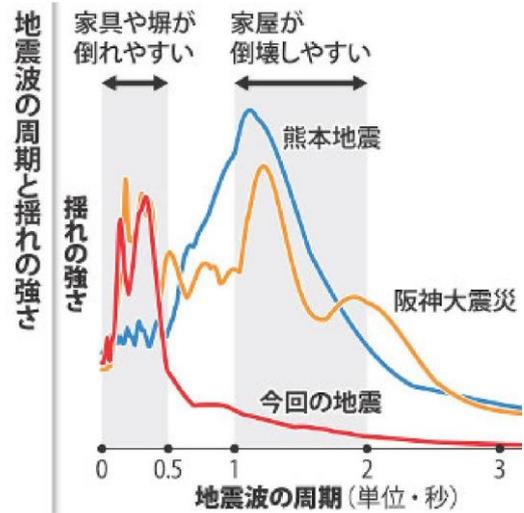


図 3. 地震波の周期の比較³⁾

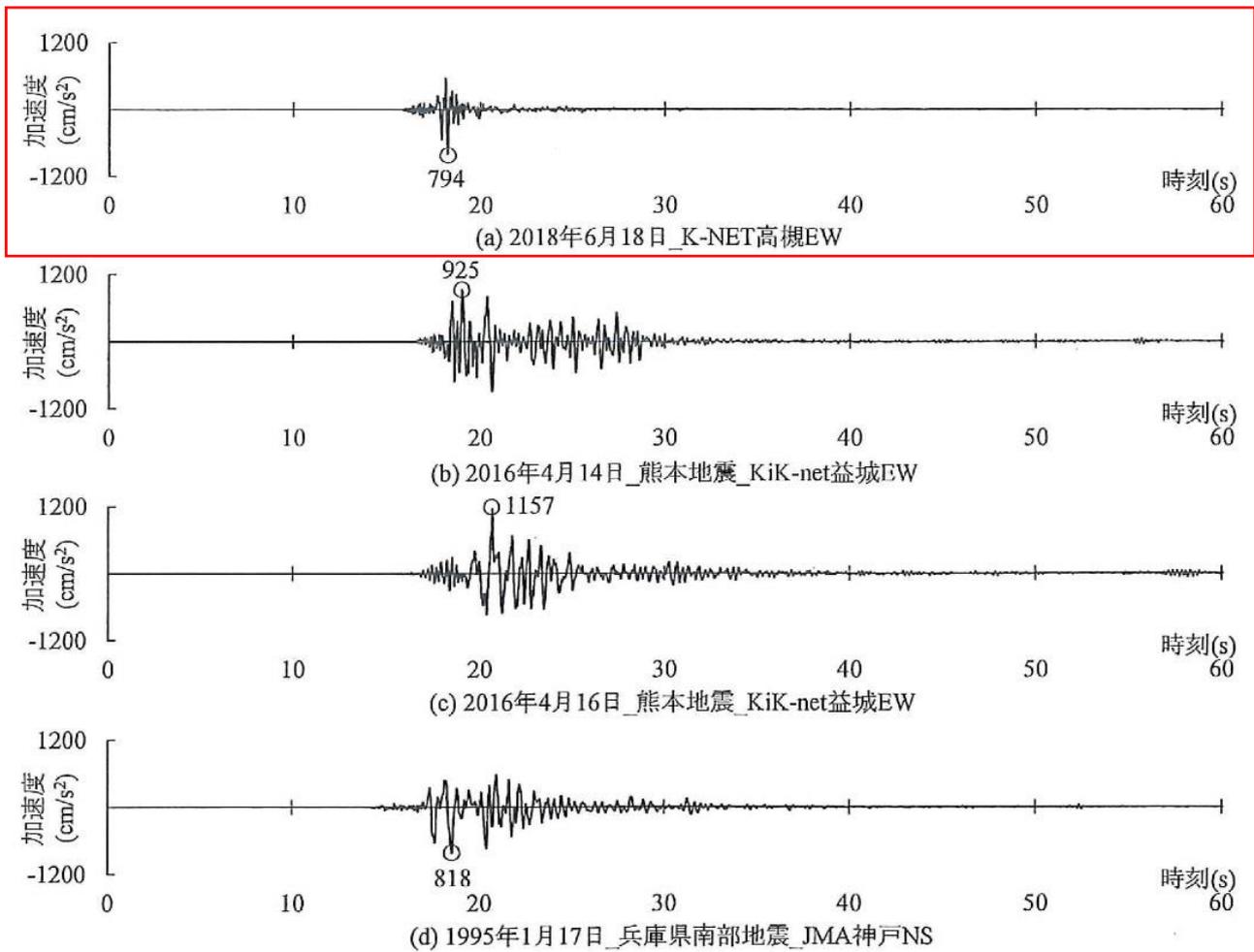


図 4. 大阪北部地震の地震波形と過去の地震波形の比較⁴⁾

4. 各地の被害状況

(1) 茨木市東中条町地区の被害

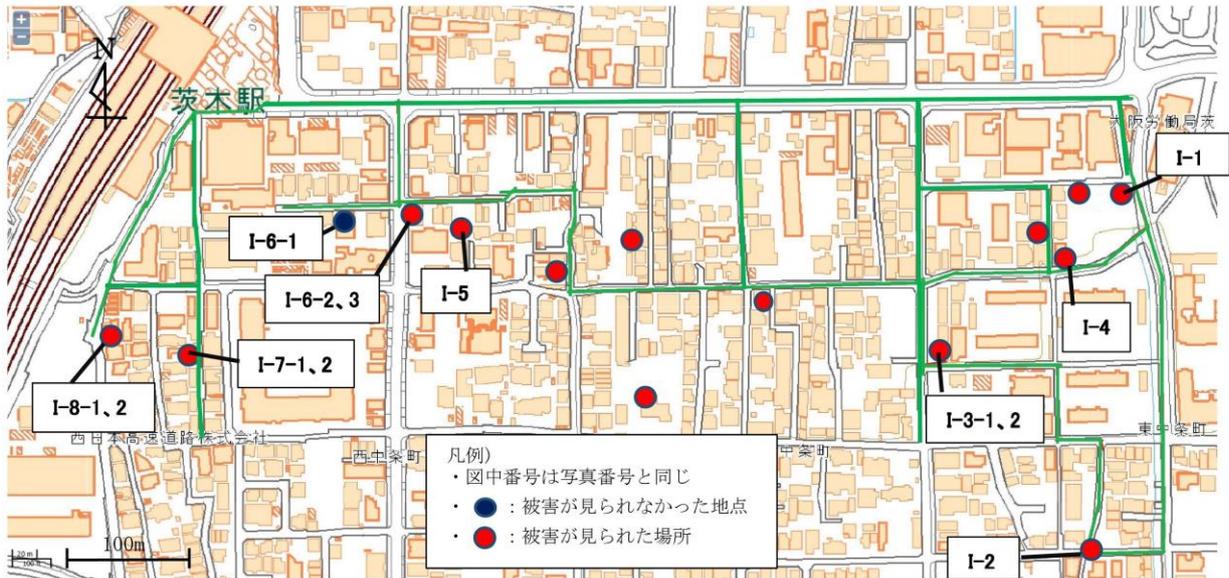


図5. 茨木市東十条地区の調査ルートと写真番号



I-1 南西方向を望む
ブルーシートで覆われる青瓦屋根の民家



I-2 北東方向を望む
ブルーシートで覆われる青瓦屋根の民家



I-3-1 北東方向を望む
ブルーシートで覆われる青瓦屋根のアパート



I-3-2 アパートの壁には、本地震による
亀裂が見られる



I-4 北西方向を望む
壁面に亀裂が見られる



I-5 南方向を望む
屋根の被害はないが、壁面に亀裂が見られる民家



I-6-1 西側から外観が廃墟のような民家を望む
本地震による影響は見られない



I-6-2 南方向を望む
I-6-1 地点すぐ東側の南北方向に並ぶブロック塀は
倒壊していた



I-6-3 南東方向を望む
I-6-1 地点から東へ40mの青瓦屋根の民家
ブルーシートで覆われる



I-7-1 北方向を望む ブルーシートで覆われる民家
要注意の張り紙が張られている



I-7-2 本地震により、茨木市からの要注意張り紙
注記には、瓦の落下に注意とある



I-8-1 北方向を望む
茨木駅東口近くの建物の補修状況



I-8-2 写真 I-8-1 の拡大
(写真北東方向を望む)
壁面に亀裂が見られる

(2) 高槻市郡家本町地区(第2中学校周辺)の被害

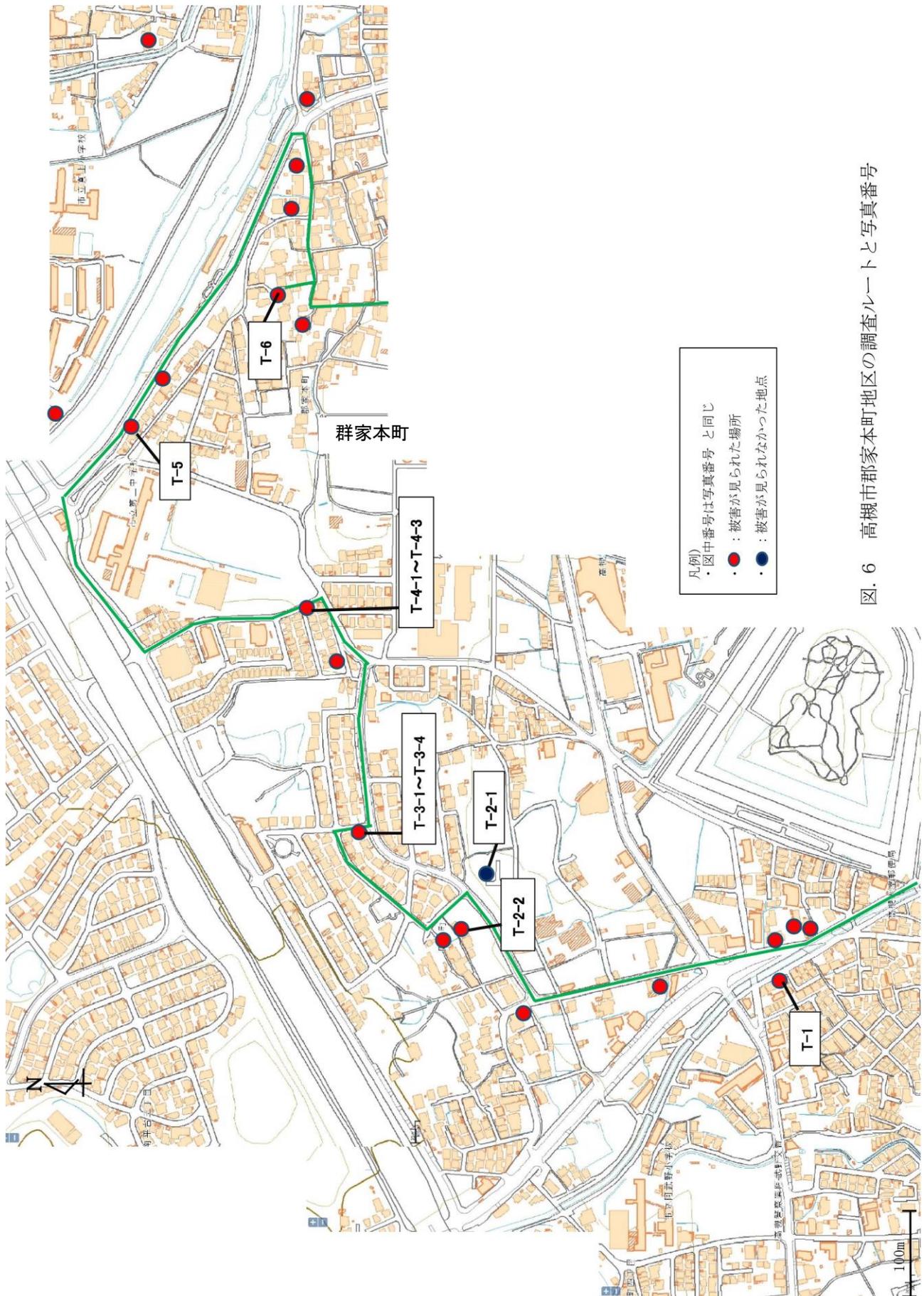


図. 6 高槻市郡家本町地区の調査ルートと写真番号



T-1 北西方向を望む
ブルーシートで覆われた青瓦屋根の民家



T-2-1 南方向を望む
T-2-2 の民家と、道路を挟み南北に並ぶ民家には、被害が見られない



T-2-2 北方向を望む
ブルーシートで覆われる民家



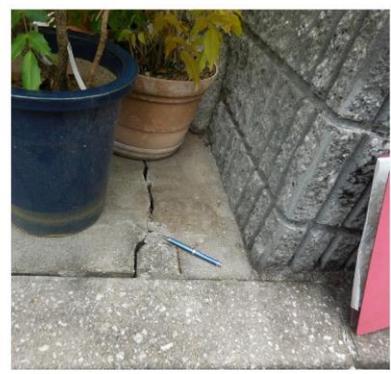
T-3-1 北東方向を望む
道路に見られる東西方向の亀裂
阪神淡路大震災の際にできた亀裂
がさらに開口した(家主談)



T-3-2 北方向を望む(T-3-1 地点西側)
南北方向に圧力が加わった
かのように、ひしゃげた側溝



T-3-3 T-3-2 地点を南東側から撮影
ひしゃげた側溝近くにできた
東西方向の亀裂



T-3-4 T-3-2 の拡大写真
家主曰く、本地震で生じた亀裂



T-4-1 北東方向を望む
道路上に幅 2cm の亀裂 右横ずれか?



T-4-2 北西方向を望む(T-4-1 から北へ5m の地点)
側溝の盛り



T-4-3 南北方向に圧力が加わったかのように
側溝が盛上っている



T-5 北西方向を望む
擁壁上部の民家のフェンス倒壊



T-6 北方向を望む
ブロック塀に脱落が見られた

(3) 枚方市大垣内地区の被害

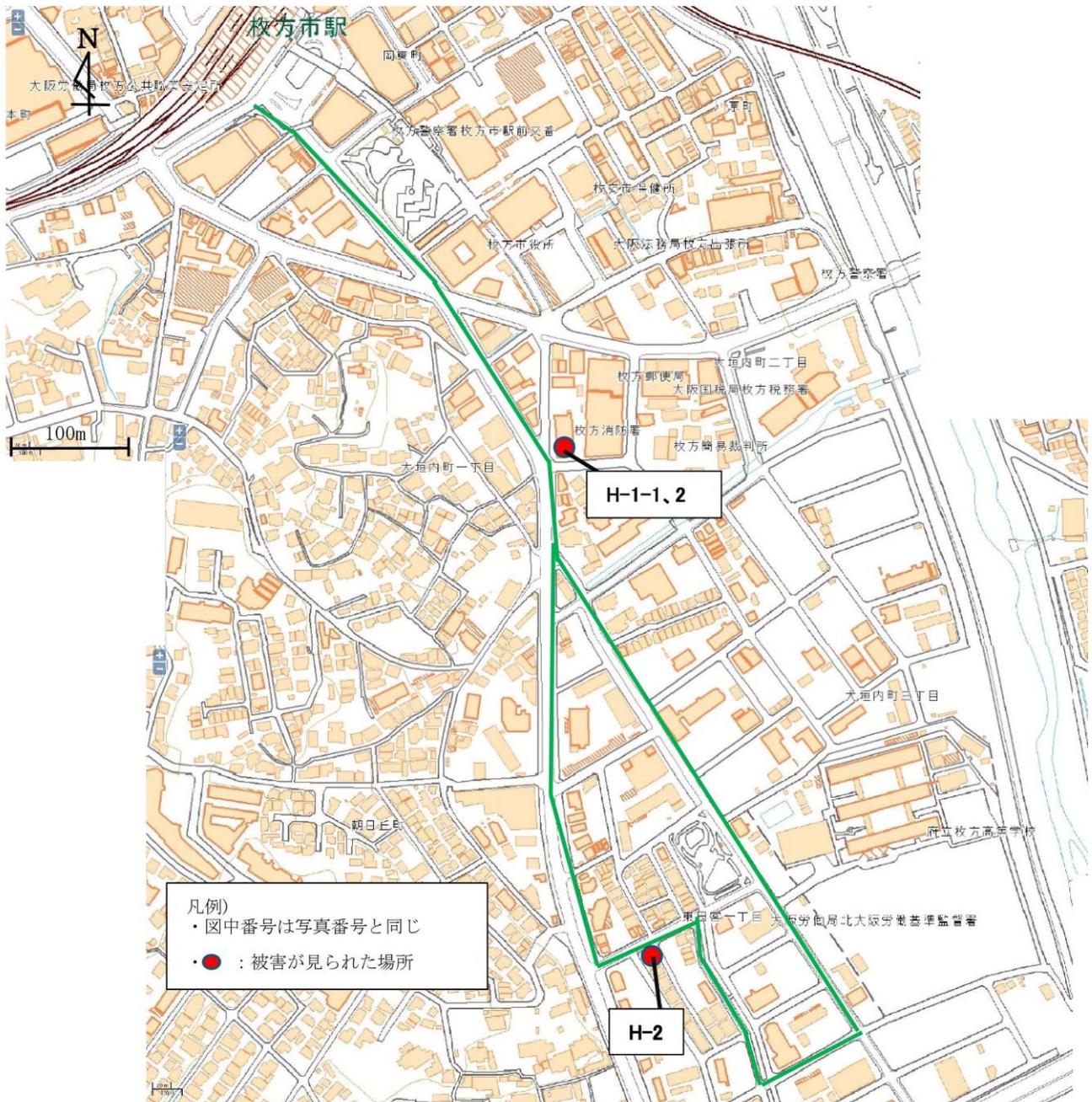


図7. 枚方市大垣内地区の調査ルートと写真番号



H-1-1 北方向を望む
枚方消防署の被害状況 阪神淡路大震災の際に
できた亀裂が、本地震でさらに開口した(職員談)



H-1-2 北方向を望む
コンクリート花壇に見られる亀裂



H-1-3 H-1-2 の拡大写真
亀裂は北西-南東方向に 2cm 開口



H-2 南西方向を望む
ブルーシートで覆われる民家
この地区では、この一軒のみしか見られなかった

5. 踏査結果の整理

治水地形分類図に被災箇所をプロットしてみた。

- (1) 茨木地区：茨木市西中条町-下中条町-東中条町
- ・地形は更新統の扇状地および微高地（自然堤防）で構成され、一部旧河道および盛土・埋立地が分布する。
 - ・マンションや宅地の亀裂は少なく、道路の変状も認められない。
 - ・ブルーシートで覆われた家屋は、屋根が青い瓦の場合がほとんどであり、東西方向に連なる傾向が見られた。
 - ・被災地点を治水地形分類図にプロットすると、すべて扇状地内にあり、扇状地と微高地（自然堤防）の境界付近に多い（図8.）。

・一部、盛土上の平屋長屋で壁に亀裂が見られ（写真I-3-2）、屋根もブルーシートで覆われていた。

（考察）

ブルーシートで屋根が覆われているのは、ほとんど青い瓦屋根で、かつ東西方向を長辺とする宅地が多かった。この青い瓦屋根は、地元の話では、ほかの瓦屋根と異なり、ただ瓦を載せただけの構造とのことで、そのため崩れやすい状況にあることが予想される。

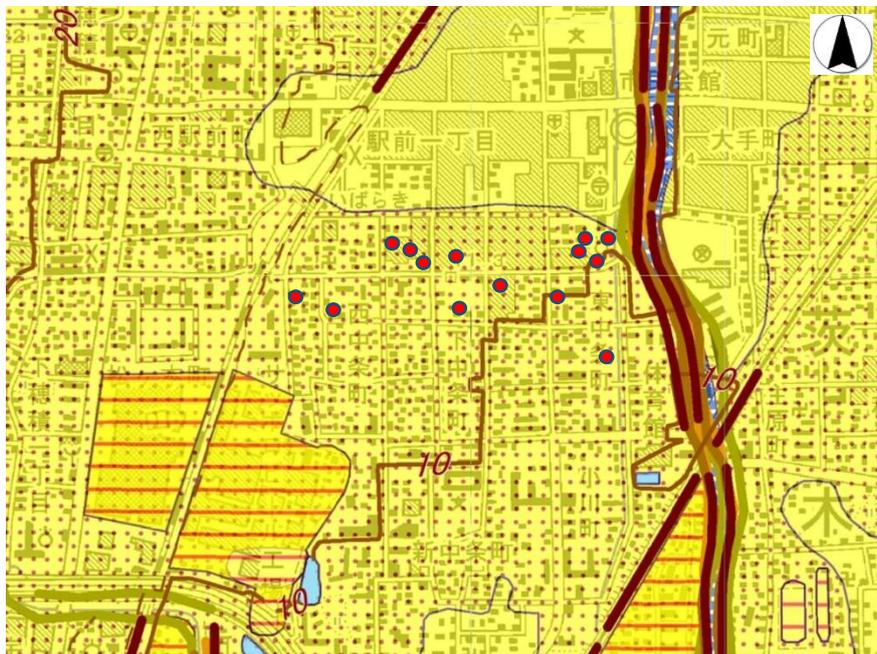


図8. 茨木地区の治水地形分類図

凡例：● 被災箇所

治水地形分類図の凡例

大分類	中分類	小分類	細分類	記号	大分類	中分類	小分類	細分類	記号	
山地					人工 改変 地形		干拓地			
台地・段丘		段丘面								
		崖(段丘崖)								
		浅い谷								
低地	山麓堆積地形				その 他の 地形 等	天井川の区間				
	扇状地						現河道・水面			
	氾濫平野					旧流路		S.30年代後半～ S.40年代前半		
	氾濫平野	後背湿地						S.20年代		
	扇状地, 氾濫平野	微高地(自然堤防)							T.末期～S.初期	
			旧河道	旧河道(明瞭)			M.末期～T.初期			
			旧河道(不明瞭)			地盤高線		主曲線		
		落堀		補助曲線						
	砂州・砂丘									

(2) 高槻地区：高槻市第2中学校周辺

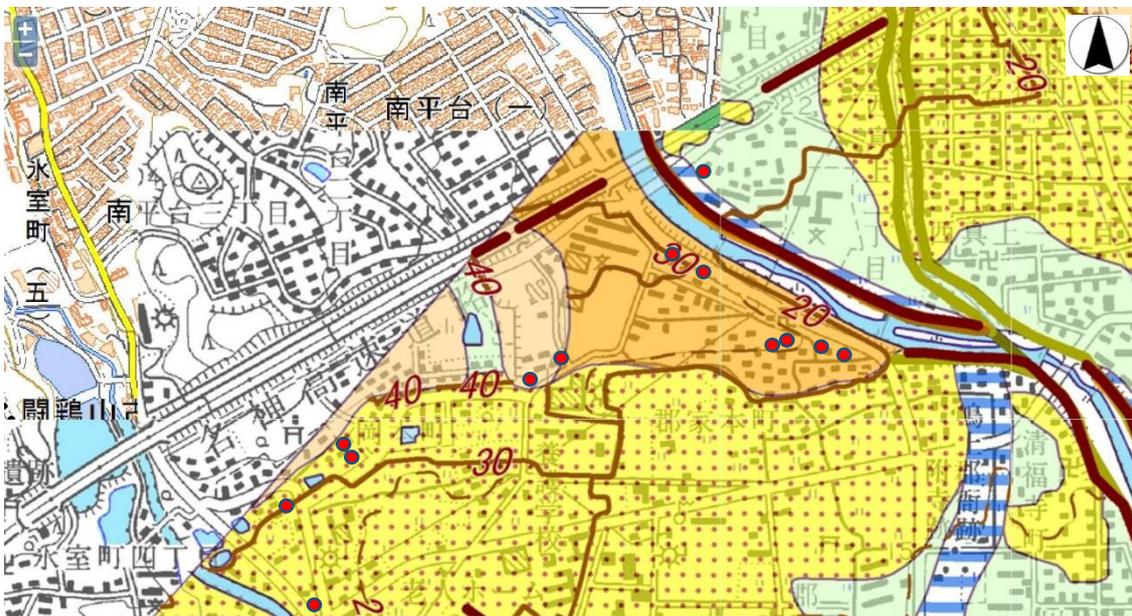
- ・踏査対象範囲は、山地地形と段丘面および扇状地と旧河道で構成される。
- ・建物被害が少なく、屋根をブルーシートで覆っている宅地は、茨木地区に比べて少ない。
- ・しかし、扇状地地形の所々では、青い瓦屋根でかつ東西方向に屋根が延びる宅地にブルーシートが多く見られた。
- ・山地と扇状地の境界付近の宅地と道路、および駐車場の底盤に東西方向の亀裂が延びているほか、南北方向に圧力を受けた変状を確認した(写真 T-3-1~T-3-4)。
- ・住人の話によれば、道路亀裂は阪神淡路大震災の際のもの(当時5mm程度の開口幅)で、今回の地震により開口幅が20mmに拡大したとのこと(写真 T-3-1)。

- ・また、今回の地震は、「震源が近いけれど揺れの時間が短かったので、阪神の時に比べて、怖くなかった。」との感想を聞いた。
- ・上記のほか、河川沿いの段丘面上部の宅地擁壁が不等沈下により崩れている地点を1箇所確認したが、宅地には大きな変状などは見られなかった。

(考察)

後述するように、活断層直上の地区であるが、大きな被害は見られなかった(図11.参照)。

被災箇所は、地形区分境界付近や河川沿いに集中している傾向が見られる。



凡例: ● 被災箇所

図9. 茨木地区の治水地形分類図

治水地形分類図の凡例

大分類	中分類	小分類	細分類	記号	大分類	中分類	小分類	細分類	記号		
山地					人工 改変 地形		干拓地				
台地・ 段丘		段丘面				盛土地・埋立地					
		崖(段丘崖)				切土地					
		浅い谷				連続盛土					
低地	山麓堆積地形				その 他の 地形 等		天井川の区間				
	扇状地					現河道・水面					
	氾濫平野					旧 流 路			S.30年代後半~ S.40年代前半		
	氾濫平野		後背湿地						S.20年代		
	扇状地, 氾濫平野	微高地(自然堤防)								T.末期~S.初期	
		旧河道	旧河道(明瞭)							M.末期~T.初期	
	旧河道(不明瞭)										
	落堀			地盤高線			主曲線				
	砂州・砂丘						補助曲線				

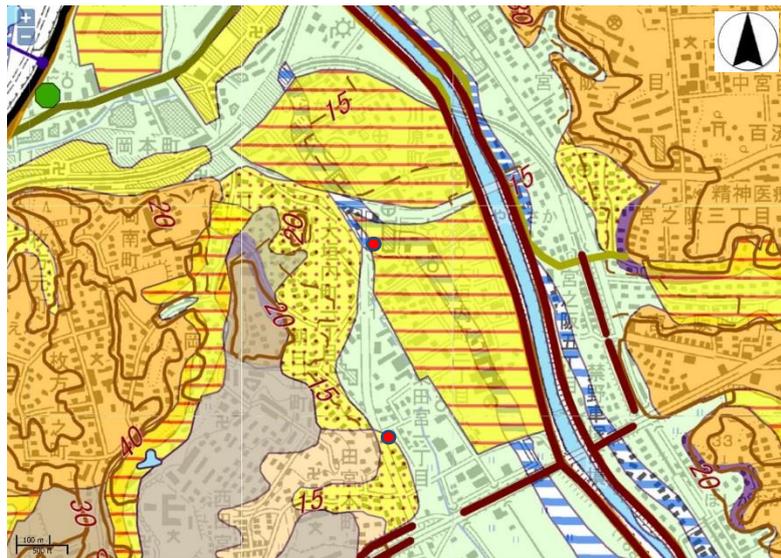
(3) 枚方地区：枚方市大垣内～河原町

- ・踏査箇所は、低地の氾濫平野内の盛土・埋立地に相当し、埋立地の一部には旧河道が北西－南東方向に走っている。
- ・ほかの2地区に比べて、変状や宅地のブルーシートは少なかった（ブルーシートは1軒のみ）。
- ・唯一確認できた変状は、消防署の階段亀裂（写真 H-1-1）。但し、この亀裂も「阪神淡路大震災の際にできたものが拡大した」との証言あり。

(考察)

茨木地区や高槻地区と比較して、被害がほとんど見られなかった。また、被害が確認できた地点は、地形区分境界付近に位置している。具体的に見ると、消防署は旧河道と氾濫平野と盛土地の境界、宅地のブルーシート地点は、扇状地と後背湿地の境界付近で確認できた。

これら結果から、地形区分の境界付近は、周囲と比較して相対的に揺れに弱い状況にあるものと考えられる。



凡例：● 被災箇所 図10. 茨木地区の治水地形分類

治水地形分類図の凡例

大分類	中分類	小分類	細分類	記号	大分類	中分類	小分類	細分類	記号
山地					人工 改変 地形		干拓地		
台地・ 段丘		段丘面		盛土地・埋立地					
		崖(段丘崖)		切土地					
		浅い谷		連続盛土					
低地	山麓堆積地形			その 他の 地形 等		天井川の区間			
	扇状地					現河道・水面			
	氾濫平野				旧流路	S.30年代後半～ S.40年代前半			
	氾濫平野	後背湿地				S.20年代			
						T.末期～S.初期			
	扇状地, 氾濫平野	微高地(自然堤防)				旧河道(明瞭)			
					旧河道(不明瞭)				
			落堀			地盤高線	主曲線		
		砂州・砂丘				補助曲線			

6. まとめ

今回の踏査結果および資料整理から、つぎの事項が考察される。

- ・この調査は、震度6弱を記録した地区（茨木、高槻、枚方）で行った。
- ・踏査した3地区は、ともに震度6弱を記録しているが、被害の程度や様相は地区毎に異なる。
- ・また、各地区の地形区分もそれぞれ異なっており、茨木地区はおもに扇状地、高槻地区は扇状地と段丘面、枚方地区は低地（扇状地、氾濫平野、旧河道）および盛土で構成される。
- ・3地区ともに卓越周期が0.3sと短いため、宅地被害が少なかったものと考えられる。
- ・また、ブルーシートで覆われた屋根のほとんどは、構造上、瓦を載せただけの青瓦屋根の宅地であり、地形区分の境界付近に立地している。

以下、地区毎の特徴を整理する。

（茨木地区）

- ・地形区分は扇状地に相当する。被災した地点は、扇端部付近に多く見られ、被災箇所が東西方向に延びる傾向を確認できた。
- ・被災箇所は、図8によれば、自然堤防との境界付近でもあることから、治水地形分類図には示されていない旧河道の存在などが示唆される。

（高槻地区）

- ・活断層が横断する地区（図11.）。道路の亀裂やブロック塀の崩落等の顕著な被害が見られたが、宅地自体の被害は皆無であった。地震波の周期特性を反映したものと想定される。
- ・写真T-3-1とT-4-1は、活断層と並行する方向に亀裂が走り、かつ右横ずれの変位と一致する亀裂も確認できたことから、活断層による変状の可能性があると考えられる。

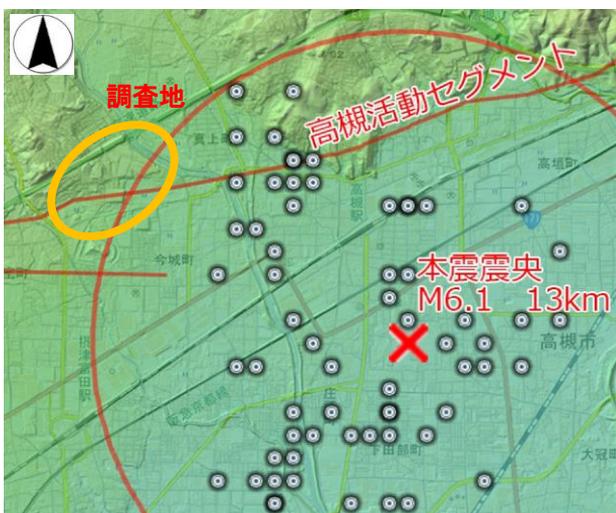


図11. 高槻地区を通る活断層⁵⁾

- ・治水地形分類図に整理した結果、被災箇所は、地形区分境界付近や段丘面の端部（河川沿い）に分布している。

（枚方地区）

- ・ほとんど被災は確認できなかったが、治水地形分類図を参考にすれば、地形区分の境界付近で2箇所の被災を確認できた。
- ・地形区分の境界付近は、地質構成も変化していると考えられるので、この地盤条件が影響して被害が表面化したものと想定される。

7. おわりに

この小論では、震度6弱を観測した3地区についてまとめ、被災の程度がそれぞれ異なることを示してきた。今回の踏査では、震源にもっとも近く、活断層が横断する高槻地区で、顕著な道路亀裂等が見られるなど、小規模ながら被害が最も目立つものであった。茨木地区は被災箇所数が多く見られた。そのほとんどは青瓦屋根の被災であり、被災箇所を見ると方向性があることが確認できた。従って、治水地形分類図では表現されていない旧河道が存在するなど、地盤が相対的に緩んだ状態が予想された。一方、枚方地区は地形区分境界付近の2箇所のみで被災が確認できた。

今回の地震が、たとえばあと数秒継続時間が長ければ、もっと多くの場所に被災が広がり、さらに、地震波の周期特性によっては、甚大な宅地被害となっていたことも懸念される。

大阪北部地震の地震波は、ちょうど被害が表面化するかどうかの規模であったと想定される。そのため、今回の地震は、最初に被害が現れやすい地点を洗い出したものであり、地形区分の境界付近は、とくに注意が必要な地盤条件にあるものと考えられる。

【参考・引用文献】

- 1) https://www.jiji.com/jc/graphics?p=ve_soc_earthquake-osaka20180618j-03-w390 : 閲覧日 2018/07/10
- 2) http://bousaisi.jp/wp-content/themes/fcvanilla/pdf/risk_20180820_01.pdf : 閲覧日 2018/07/10
- 3) <https://mainichi.jp/articles/20180620/k00/00e/040/33100c> : 閲覧日 2018/07/10
- 4) 宮本裕司ほか (2018) : 平成30年6月18日大阪府北部の地震での免震建物の地震後調査 (速報)
- 5) 国土交通省 DiMAPS (災害情報統合システム) : 閲覧日 2019/03/13

Kaidun 角レキ岩隕石中の特異な岩片についての鉱物学的研究

東 浩太郎

日本物理探鑛株式会社 関東支店

1. はじめに

太陽系惑星の形成過程について次のように考えられている。原始太陽系円盤内にはマイクロメートルサイズの主に鉄や岩石、氷からなる個体微粒子であるダストが存在した。このダストが互いに衝突合体を繰り返し最終的に数キロメートルサイズの微惑星が形成された。その後微惑星も衝突合体を繰り返し、サイズが大きくなり、原始惑星となると天体内部で溶融が起き、地殻・マントル・コアなどに層が分かれ分化した。その後原始惑星同士が衝突合体し現在の惑星サイズまで成長したと考えられている。隕石には惑星形成の初期における原始太陽系円盤や微惑星の情報を保持しているコンドライトといった始原的隕石や、分化した後の原始惑星や火星、月などが起源と考えられているエコンドライト、鉄隕石、石鉄隕石といった分化隕石が存在する。そのためこれらの隕石の形成過程を解明することは、太陽系形成過程、惑星形成過程を解明する上で重要である。

本研究では Kaidun 隕石を研究対象として用いた。Kaidun 隕石は 1980 年南イエメンの旧ソ連軍基地に落下し、回収された隕石であり、全質量は 850g である (Zolensky and Ivanov, 2003) (図 1a)。Kaidun 隕石の特徴の一つに多様な隕石種を含むポリミクト角レキ岩であることがあげられる (図 1b)。含まれる隕石種には始原的隕石である炭素質コンドライト、エンスタタイトコンドライト、普通コンドライト、R コンドライトや玄武岩質の分化隕石など、惑星の進化過程において様々な段階の隕石を含有している (e.g. Zolensky and Ivanov, 2003; MacPherson et al., 2009)。また既存の隕石とは異なる特徴を持つ隕石岩片も見つかっている (Zolensky and Ivanov, 2003)。そのため太陽系初期に存在した微惑星・原始惑星、また現在の小惑星帯の多様性を知るうえで有用

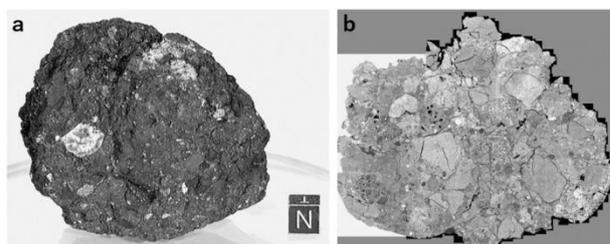


図 1. 両方の画像とも Zolensky and Ivanov (2003)より

(a)Kaidun 隕石の全体の写真. 右下のスケールは一辺 1cm.

(b)Kaidun 隕石の研磨試料の後方散乱電子 (Back-scattered electron: BSE) 画像.

な隕石である。既存の隕石とは異なる特徴を持つ隕石岩片の一つに水質変成を受けたエンスタタイトコンドライト岩片が存在する。

エンスタタイトコンドライトは構成鉱物より非常に還元的な環境で形成された始原的な隕石と考えられており、酸素同位体比がコンドライトの中で唯一地球の質量分別線上に乗ることが知られている (Clayton and Mayeda, 1984; Javoy 1995) (図 2)。そのため内側太陽系で形成され、地球の初期物質であった可能性が指摘されている (Weisberg and Kimura, 2012; Herwartz et al., 2014)。ほとんどのエンスタタイトコンドライトは水質変成を受けていないが、これまでに 2 例の試料で水質変成の痕跡が見つかっている (El Goresy et al., 1988; Zolensky and Ivanov, 2003)。もしも、水を有するエンスタタイトコンドライト母天体が存在したとすると地球の水の直接の起源となる可能性があるため、エンスタタイトコンドライトの水質変成の起源を理解することは重要である。

水質変成を受けたエンスタタイトコンドライトには不透明鉱物の変質物や Si と Fe からなる組成の均一な水和物が見つかっている (Ivanov et al., 1993; Ivanov et al., 1998). また酸素同位体も測定されており (Ziegler et al., 2012), Kaidun 母天体もしくはエンスタタイトコンドライト母天体での変成が考えられているが, 変成条件やその過程について詳細にはわかっていない. そのため本研究では水質変成を受けた報告のあるエンスタタイトコンドライト岩片試料に加え, 新たにこれまで研究の行われていないエンスタタイトコンドライト岩片 3 試料について分析を行った. またエンスタタイトコンドライトの熱水変成実験も併せて行い, 変成過程や変成条件を推定することを試みた.

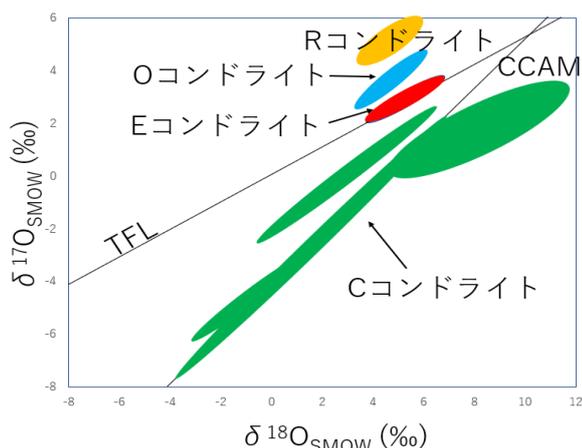


図 2. コンドライトの酸素同位体比 Goodrich et al. (2015)の図を改定

2. 分析試料

Kaidun 隕石から分離した岩片のうちエンスタタイトコンドライト岩片を含む 3 種類の厚片試料 (#40.7.1, #53.07g, #10d) を NASA ジョンソン宇宙センターの Michael E. Zolensky 博士より提供いただき分析を行った. 厚片試料は, 元々ロシア科学アカデミーの Andrey Ivanov 博士 (故人) から Zolensky 博士に提供されたものであるが, Kaidun 隕石のどの部分から分離されたか, どの

ようなコンテクストであったかなどの試料情報についてははっきりとしていない.

また, EL5 コンドライトに分類されている Northwest Africa (NWA) 1222 については, Kaidun 中のエンスタタイトコンドライトと比較するために薄片試料を作成し, 分析を行った. さらに Kaidun 隕石中のエンスタタイトコンドライト岩片の水質変成環境を考察するために, チップを用いて様々な溶液条件での熱水変成実験を行った.

3. 分析手法

まずは, 偏光顕微鏡で薄片試料の観察を行った. その後, 電解放出型電子線マイクロアナライザー (FE-EPMA) を用いて元素マッピングおよび定量分析を行った. エンスタタイトコンドライト中の変質物の同定・分析のためにはラマン分光分析, 電解放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) を用いた電子線後方散乱回折分析 (Electron back-scattered diffraction: EBSD) を行った. また変質物中の水の存在を確かめるために顕微赤外分光分析, 変質物中の鉄の価数測定のために放射光鉄 X 線吸収端近傍構造分析 (Fe-XANES) を行った.

以上の分析に加えて, 変質物の形成環境の推測のためにエンスタタイトコンドライトの熱水変成実験を行った. 出発物質として EL5 コンドライトに分類されている NWA1222 を用いた. 実験は, この NWA1222 を約 2 mm 四方に砕き, 反応溶液とともに温度は 150 °C, 反応時間は 2 週間の条件で実験を行った. 反応溶液は 1N-HCl, H₂O, 1N-NaCl, 0.01N-NaOH, 0.1N-NaOH, 1N-NaOH の酸性からアルカリ性まで 6 種類用いた. 実験後の試料は半分は切断し, 研磨試料を作成し FE-EPMA で組織観察, 元素マッピング, 定量分析を行った.

4. 分析結果

4.1. 試料概説

(1) Kaidun #40.7.1

図3に試料全体のBSE画像を示す。Ivanov et al. (1986)の報告にあるように主にエンスタタイト、Fe-Ni合金、トロイライトの粗粒な粒子から構成されているEH5コンドライトに分類される試料であった。また図4にNa, Al, Fe, Niの元素マッピングを示す。中央部分と比べ両端約1mmの範囲でNa, Al, Fe, Niの含有量が明らかに少なくなっており、明瞭な境界がみられた。Zolensky and Ivanov (2003)で変成部と非変成部の明瞭な境界が存在すると報告があったが、この境界は両端に見られた。

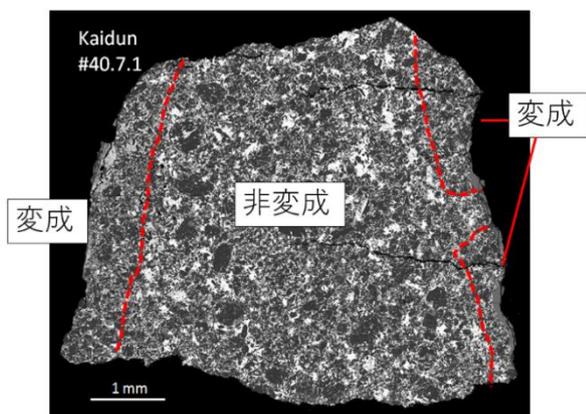


図3. Kaidun #40.7.1 の BSE 画像

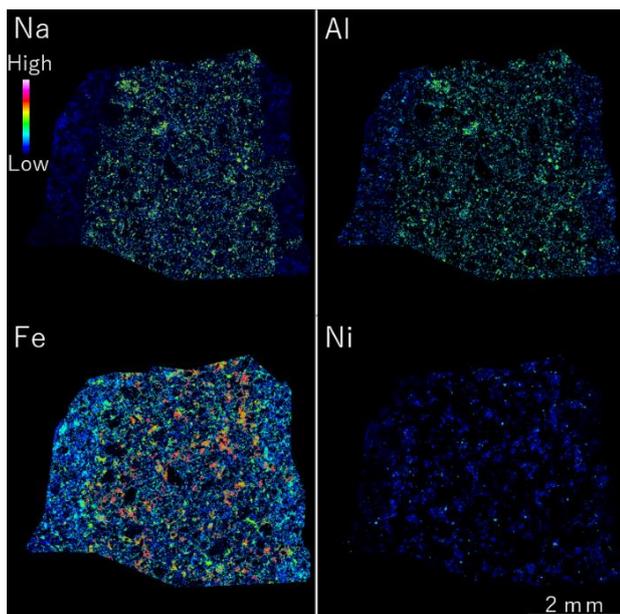


図4. Kaidun #40.7.1 の Na(左上), Al(右上), Fe(左下), Ni(右下)の元素マップ。

(2) Kaidun #53.07g

図5に試料全体のBSE画像とMgの元素マップを示す。約1.5mm×1.5mmのエンスタタイトコンドライト岩片と約2.5mm×1.5mmの炭素質コンドライト物質が明瞭な境界とともに接して存在していた。エンスタタイトコンドライト岩片は主にエンスタタイトとFe-Ni合金の粗粒な粒子で構成されているEH5に分類される試料であった。また明瞭なコンドリユールは存在しなかった。図6はエンスタタイトコンドライト岩片部分のNa, Al, Fe, Niの元素マッピングである。中央部分と比べ周縁部でNa, Al, Fe, Niの含有量が明らかに少なくなっており、中央部分是非変成であるのに対し、周縁部は変成を受けていた。

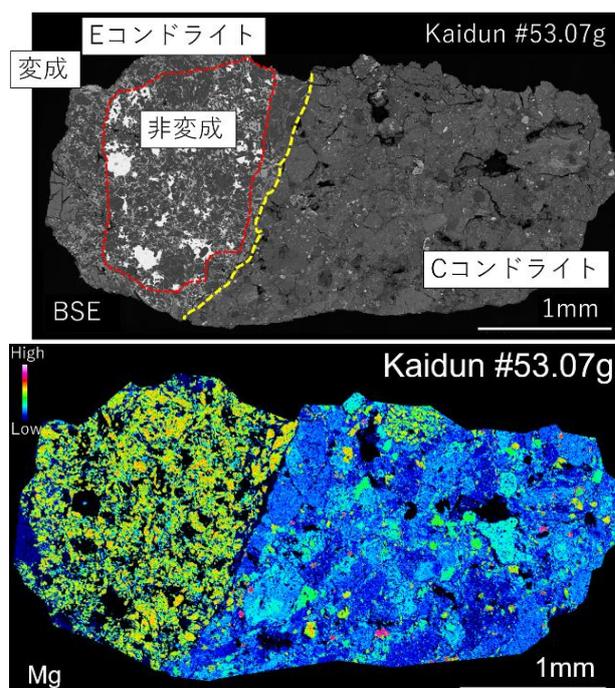


図5. Kaidun #53.07g の BSE 画像(上図)と Mg の元素マップ(下図)

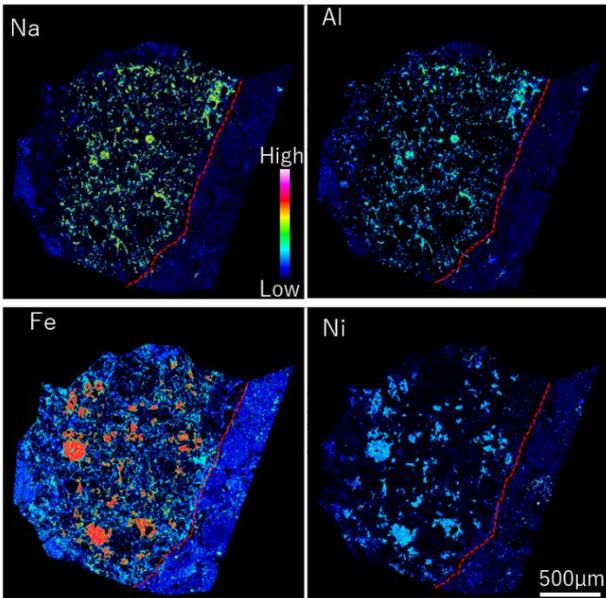


図 6. Kaidun #15415 53.07g の Na(左上), Al(右上), Fe(左下), Ni(右下)の元素マップ.

(3) Kaidun #4

図 7 に試料全体の BSE 画像の示すように, この試料は様々な種類の岩片を含む試料であった. 様々な岩片の一つにエンスタタイトコンドライト岩片が存在した (図 7 右図). 約 0.8 mm × 0.4 mm の大きさであった. 主要構成鉱物はエンスタタイト, ナイニンジェライトであり, Kaidun #40.7.1, #53.07g の非変成部に似た組織を持つ EH5 コンドライトに分類される岩片であった.

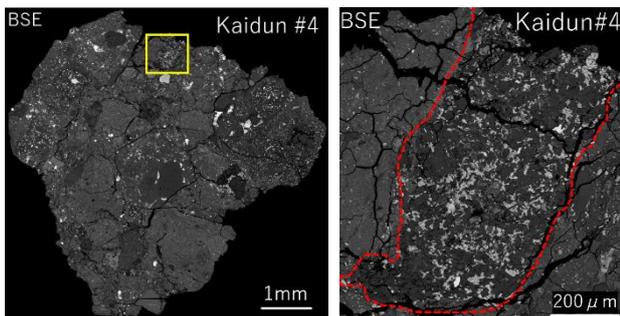


図 7. (左図)Kaidun #4 の BSE 画像, 黄四角がエンスタタイトコンドライト岩片 (右図)Kaidun #4 中のエンスタタイトコンドライト岩片の BSE 画像

(4) Kaidun #10d

図 8 に試料全体の BSE 画像を示す. 大部分がエンスタタイトコンドライト岩片となっており, 明瞭なコンドリュールが観察され, EH3 コンドライトに分類される試料であった. また図 9 に試料全体の Na, Al, Fe, Ni の元素マッピングを示す. 一部分にのみ Fe-Ni 合金と斜長石が存在しており, それ以外の大部分で Na, Al, Fe, Ni の含有量が減少していた.

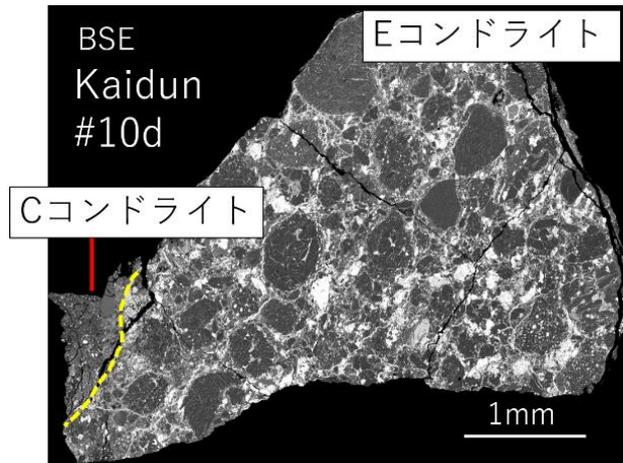


図 8. Kaidun #10d の BSE 画像

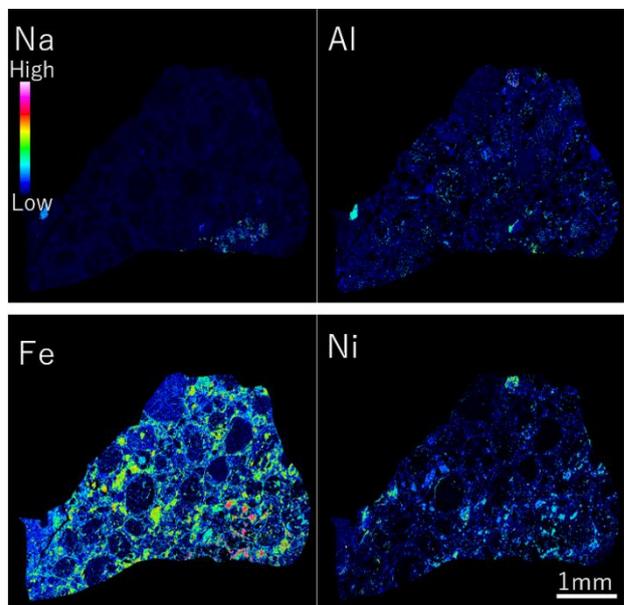


図 9. Kaidun #10d の Na(左上), Al(右上), Fe(左下), Ni(右下)の元素マップ

4.2. 構成鉱物

4つの試料について主要構成鉱物をまとめた表を表1に示す。特徴としてはFe-Ni合金, 斜長石, シリカ鉱物, シュライバーサイトが非変成部には存在しているものの, 変成部には存在していないことが挙げられる。また変成部にはEPMAで測定することのできない軽元素を多量に含む物質が2種類存在していた。

試料	#40.7.1, #53.07g, #4		#10d
種類	EH5 非変成	EH5 変成	EL3
斜長石 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	○		
シリカ鉱物 SiO_2	○		
Fe-Ni 合金 Fe, Ni	○		
シュライバーサイト $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$	○	○	
エンスタタイト $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	○	○	○
トロイライト FeS	○	○	○
ナイニンジェライト $(\text{Mg, Fe, Mn})\text{S}$	○	○	○

表 1. 主要構成鉱物まとめ

一つ目はFe, Niに富む物質であった(図10a)。~80 wt% FeOであり, 他にSi, Ni, Sなど様々な元素を含み, EPMAで測定できない軽元素を10 wt%ほど含有している物質であった。ラマン分光分析ではブロードなピークが得られたが, 既存の鉱物にピークの合うものなかったため, 結晶度のわるい物質と考えられる。

二つ目はMg, Alに富む物質であった(図10b)。~50 wt% FeO, ~34 wt% SiO_2 , ~22 wt% MgO, ~19 wt% Al_2O_3 であり, 他にS, Ni, Ca, Naなど様々な元素を含み, EPMAで測定できない元素を15 wt%ほど含有している物質であった。顕微赤外分光分析の結果, 一部の物質で水の吸収が確認された。ラマン分光分析では明瞭なピークが得られず, EBSD分析でも菊池線が得られなかったため非晶質な物質であると考えられる。

また今回観察したKaidun隕石試料中のエンスタタイトコンドライト岩片の外側には主に層状ケイ酸塩からなる炭素質コンドライト物質が存在した。エンスタタイトコンドライト岩片と炭素質コンドライト物質の境界には, 境界に沿って細長く炭酸カルシウムが存在していた(図11)。ラマン分光分析の結果明瞭なピークが得られ方解石であった。

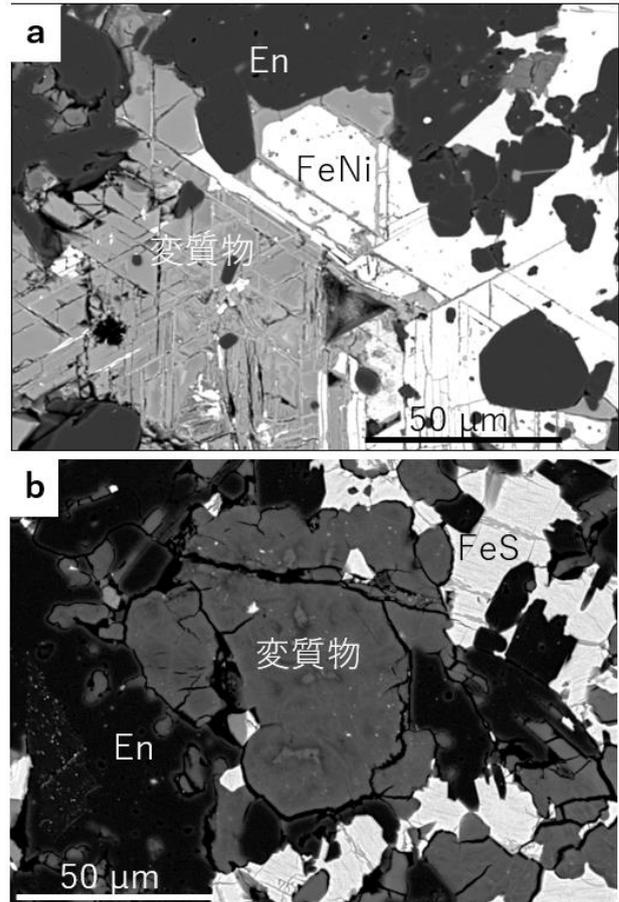


図 10. Kaidun #40.7.1 中の Fe, Ni に富む物質 (a), Mg, Al に富む物質 (b) の BSE 画像。両方の図とも En はエンスタタイト, FeNi は Fe-Ni 合金, FeS はトロイライト。

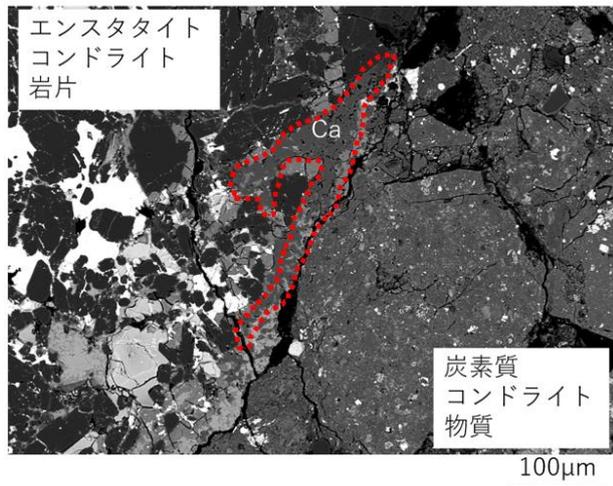


図 11. エンスタタイトコンドライト岩片と炭素質コンドライト物質の境界の方解石(Ca).

4.3. 熱水変成実験

熱水変成実験試料の実験前、実験後の実体顕微鏡写真、実験後試料断面の BSE 画像を図 12 に示す。ただし 0.01N-NaOH, 0.1N-NaOH, 1N-NaOH は同様の特徴を持っていたため、1N-NaOH のみ示している。

1N-HCl を反応溶液として用いた試料では Fe-Ni 合金とトロイライトが消失していた。H₂O と 1N-NaCl を反応溶液として用いた試料では内部の構成鉱物に変化はなかったが、表面のみ変成しており赤茶色の物質が析出していた。この物質は Fe, Si など様々な元素を含み、EPMA で測定できない軽元素を 11-25%ほど含む物質であった。0.01N-NaOH, 0.1N-NaOH, 1N-NaOH を反応溶液とした資料では内部の構成鉱物に変化はなかったが、周縁部には白色の物質が析出していた。析出量はアルカリ性が強くなるほど多くなっていった。析出物の化学組成は主に Si からなる物質であった。

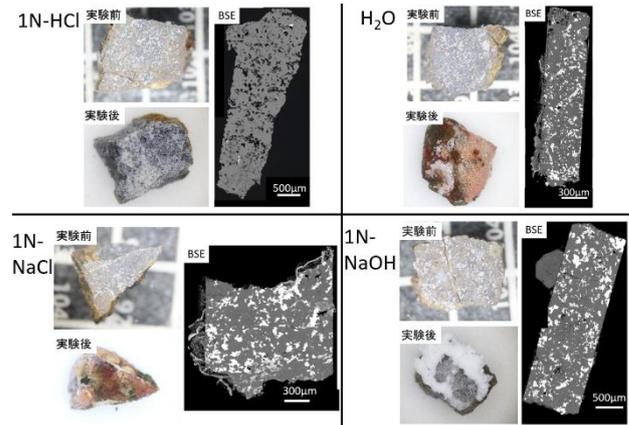


図 12. それぞれ実験前 (左上), 実験後 (左下) の実体顕微鏡写真, 実験後資料断面の BSE 画像 (右写真). 左上が 1N-HCl, 右上が H₂O, 左下が 1N-NaCl, 右下が 1N-NaOH の実験試料写真 (それぞれ 3 枚)

5. 考察

5.1. エンスタタイトコンドライト岩片の水質変成

Kaidun #40.7.1, Kaidun #53.07g, Kaidun #10d, Kaidun #4 の4つの試料には、いずれもエンスタタイトコンドライトが部分的に水質変成を受けたと考えられる岩相が見られた。これらのエンスタタイトコンドライト岩片にはEPMAでの収量が低く、様々な元素を含み、その含有量にばらつきのある物質が共通に存在した。一部のものには顕微赤外分光分析で水の吸収も確認された。そのためこれらの物質は水を含むためにEPMAでの収量が低く、非平衡な水質変成により形成された変質物であると考えられる。また、放射光 Fe-XANES により鉄の多くが Fe³⁺として存在することも明らかになったために、EPMAでのFe酸化物組成をFeOとして計算したことも低収量に寄与していたことが明らかになった。

これらの変質物にはFe, Niに富む物質とMg, Alに富む物質の2種類が存在した。Kaidun #40.7.1 および Kaidun #53.07g にはこれらの変質物が存在する変質部分と変質物のない非変質部分に分かれていた。また変質部分では非変質部分と比べ、Fe-Ni合金と斜長石が存在していなかった。Fe, Niに富む変質物はFe-Ni合金と接するものや内部に残存するものが存在し、Fe-Ni合金に見られた特徴的な劈開に似た割れ目が存在しているものもあった。そのためFe, Niに富む変質物はFe-Ni合金の変質物であると考えられる。この変質物はIvanov et al. (1993)とIvanov et al. (1998)で報告のあったFe-Ni合金もしくはシュライバーサイトの変質物と似た組織、組成をしているため同様の物質と考えられる。この変質物はFe-Ni合金と比べ、Feの含有量が減少しSiの含有量が増えており、Fe-Ni合金には含まれないMgやAlなどの元素も含まれているため、周囲の鉱物と反応もしくは水質変成を起こした流体からこれらの元素がもたらされた可能性がある。

一方で、Mg, Alに富む変質物は粒径や組織が斜長石と似ており、Kaidun #10dには斜長石質のガラスと接して存在しているものもあった。そ

のためこのMg, Alに富む変質物は斜長石もしくは斜長石質のガラスの変質物であると考えられる。この変質物は斜長石と比べNaが枯渇しており、AlやSiの含有量が減少し、FeやMgなど様々な元素が含まれていた。エンスタタイトコンドライト岩片中の斜長石の水質変成ではNaが溶脱しやすく、周囲の鉱物と反応もしくは水質変成を起こした流体からFeやMgなどの元素がもたらされた可能性がある。

それぞれの岩片で大きさやエンスタタイトコンドライトの種類、岩石学的タイプが異なるにも関わらず、変質物の組成はとてもよく似た組成を示していた(図13)。そのためこれらの岩片はいずれもよく似た環境、条件で水質変成を受けたと考えられる。3つのEH5のエンスタタイトコンドライト岩片は似た組織、変成度であるため元々同じ起源であったと考えられるが、別々の破片となり現在Kaidun隕石に取り込まれている。Fe-Ni合金の変質物は主にFe, 斜長石もしくは斜長石質のガラスの変質物は主にNaが水質変成により溶脱していると考えられるが、水質変成を受けたエンスタタイトコンドライト岩片の周囲には特にNaに富む物質は存在していない。そのためエンスタタイトコンドライト岩片の水質変成に寄与した流体は変質を起こした後に何かしら物質を晶出することなく抜けていた可能性がある。

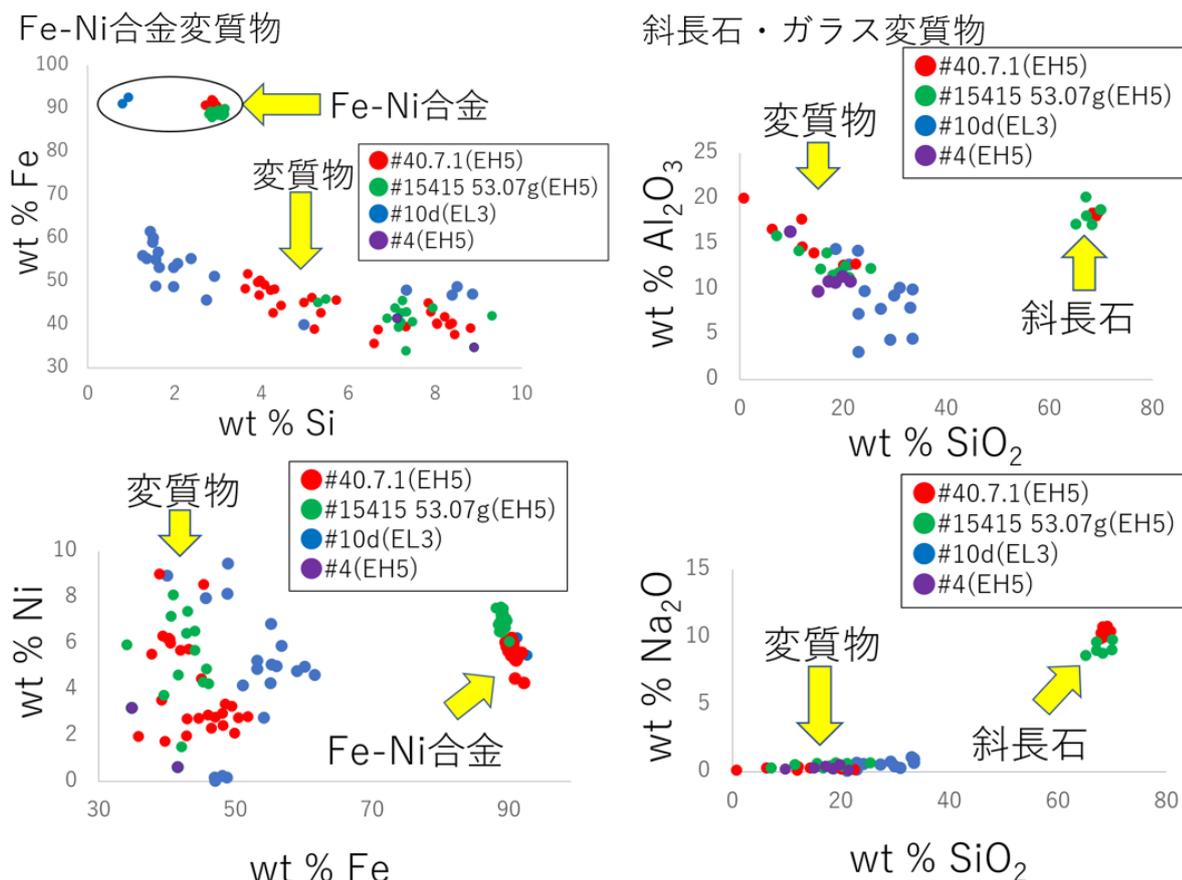


図 13. Fe-Ni 合金変質物の Si と Fe (左上), Fe と Ni (左下), 斜長石もしくは斜長石質ガラス変質物の SiO₂ と Al₂O₃ (右上), SiO₂ と Na₂O (右下) の化学組成プロット

5.2. 熱水変成実験

次にこの流体について、熱水変成実験の結果をもとに考察していく。1N-HCl を反応溶液とした試料は、Fe-Ni 合金やトロイライトが完全になくなっていった。Kaidun 隕石中のエンスタタイトコンドライト岩片の変質部分にはトロイライトは残存しており、Fe-Ni 合金は変質物に大部分は変化していたものの、部分的には残存していたため、少なくともエンスタタイトコンドライト岩片を変質した流体は酸性ではないと考えられる。

NaOH を反応溶液とした試料ではアルカリ性が強くなるにつれシリカ鉱物の析出量が増大していた。しかし実験試料のエンスタタイトコンドライトの内部に変化はなかった。今回の実験では反応容器としてガラス管を用いており、NaOH がガラス管と反応したことによりシリカ鉱物が析出したと考えられる。

H₂O と 1N-NaCl を反応溶液とした試料では赤茶色の物質が析出していた。また試料中に一部変質物も存在していた。これら物質の組成は Kaidun 隕石中のエンスタタイトコンドライト岩片中の Fe-Ni 合金の変質物の組成に似ている (図 14)。そのためエンスタタイトコンドライト岩片の水質変成に寄与した流体は中性であった可能性があると考えられる。炭素質コンドライトはモデル計算 (Zolensky et al., 1989) や熱水変成実験 (Ohnishi and Tomeoka, 2007) より中性からアルカリ性の流体により変成が起きたと言われている。Kaidun 隕石は炭素質コンドライトに富むことから、Kaidun 母天体は C 型の小惑星であったと考えられており (Zolensky and Ivanov, 2003)、Kaidun 母天体上で水質変成が起きた場合アルカリ性の流体が寄与する可能性がある。そのためエンスタタイトコンドライト岩片は Kaidun 母天体

上では水質変成は起きていないことが示唆される。しかし今回の実験では斜長石の変質物ができておらず、試料内部まで熱水変成をすることができなかつたため、より長時間で実験を行うなど、反応が起きやすい条件での再実験を行う必要がある。

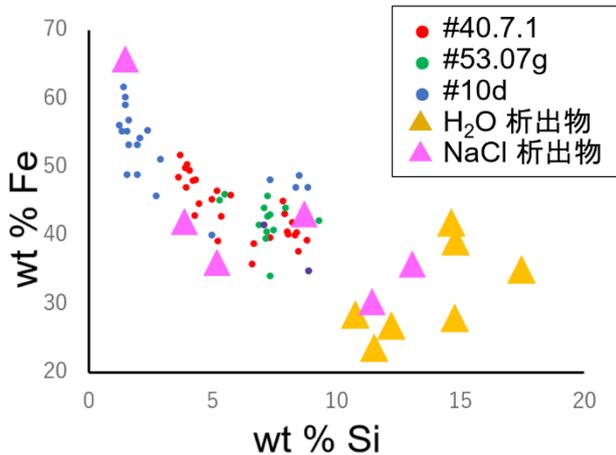


図 14. H₂O, 1N-NaCl 実験試料の析出物と Fe-Ni 合金変質物の Fe と Si の化学組成プロット

5.3. エンスタタイトコンドライト岩片の水質変成はどこで起こったか？

本研究により、Kaidun 中には EH コンドライトと EL コンドライトの 2 種類のエンスタタイトコンドライトが部分的に水質変成を受けているものが見つかった。これらは、異なるエンスタタイトコンドライトグループにも関わらず、よく似た特徴（化学組成、部分的に非変成部分が残っていることなど）を示していた。EH コンドライトと EL コンドライトは母天体が別と考えられ（e.g., Keil, 1989）、さらに、EH コンドライト岩片は岩石学タイプが 5 だったのに対して、EL コンドライトはタイプ 3 だったために、それぞれの母天体での形成深度も大きく異なつたはずである。このような違いが存在するにもかかわらず、よく似た水質変成物が存在したことは、両者が Kaidun 母天体に集積してから水質変成が起こつた可能性が高いことを示していると考えられる。しかし、Kaidun 中には水質変成を受けていないエンスタタイトコンドライトも含まれている。以

上より二つの水質変成モデルが考えられる。一つ目は EH コンドライト岩片と EL コンドライト岩片がそれぞれの母天体から衝突により宇宙空間に放出された後に、Kaidun 隕石の前駆的な母天体に集積し、そこで水質変成を受けたというモデルである。このような前駆天体の破壊が起き、水質変成を受けたエンスタタイトコンドライトと水質変成を受けていないエンスタタイトコンドライトが再集積したものが Kaidun 母天体かもしれない。二つ目は EH コンドライト岩片と EL コンドライト岩片がそれぞれの母天体から衝突により宇宙空間に放出された後に、Kaidun 母天体に集積し、Kaidun 母天体上での部分的な水質変成により変成を受けたというモデルである。部分的な水質変成を受けた後、Kaidun 母天体への何らかの衝突により水質変成部分と変成を受けていない部分が混合し Kaidun 隕石のようなものが形成された可能性がある。

また、Kaidun 中では、エンスタタイトコンドライト岩片と炭素質コンドライト物質の境界に方解石が普遍的に存在していた。この方解石は境界に沿って細長い形をしており、周囲の炭素質コンドライト物質には鉄に富む物質が線状に配置しているような組織が見られるものもあった。このような岩片の境界に沿った細長い方解石は、炭素質コンドライト岩片同士の境界では見られず、水質変成を受けたエンスタタイトコンドライト岩片と炭素質コンドライト物質の境界特有のものであった。これらの観察結果は、水質変成を受けたエンスタタイトコンドライト岩片と炭素質コンドライト物質の境界に流体が流れ、方解石を形成したことを示唆していると考えられる。このことは、エンスタタイトコンドライトに見られる水質変成物の形成イベントと方解石の形成イベントが別々であり、方解石の形成は Kaidun 隕石母天体に最終的に集積した後に起こつた可能性を示している。

方解石の水質変成を起こした水の起源ははっきりしないが、例えば、温度上昇により水質変成を受けたエンスタタイトコンドライトと炭素質

コンドライト物質に含まれていた層状ケイ酸塩からの脱水が起源の可能性がある。これは、Kaidun 母天体に水質変成を受けたエンスタタイトコンドライトと炭素質コンドライトが集積する際の衝突によって温度上昇が起こったことが熱源の一つの候補である。

6. まとめ

1. ポリミクト角レキ岩隕石である Kaidun に対して、様々な岩片を含む薄片試料 2 つ (Kaidun #4, Kaidun #15415 01.3.19e), 顕著な水質変成を受けているエンスタタイトコンドライト岩片を含む試料 3 つ (Kaidun #40.7.1, Kaidun #53.07g, Kaidun #10d) について様々な鉱物学的分析を行い、エンスタタイトコンドライトの熱水変成実験結果と合わせて解釈することで、どのような環境でエンスタタイトコンドライトの水質変成が起こったのか検証を行なった。

2. Kaidun #40.7.1, Kaidun #15415 53.07g, Kaidun #10d, Kaidun #4 には水質変成を受けたエンスタタイトコンドライト岩片 (EH5 と EL3 コンドライトの変質物) が存在した。すべての試料に Fe, Ni に富む変質物および Mg, Al に富む変質物が存在した。また Kaidun #40.7.1, Kaidun #15415 53.07g には変成部分と非変成部分が存在し、明瞭な境界が見られた。非変成部分に対し変成部分では Fe-Ni 合金と斜長石が存在していなかった。

3. Fe, Ni に富む変質物は Fe-Ni 合金と, Mg, Al に富む変質物は斜長石と共通の特徴を持つため Fe-Ni に富む変質物は Fe-Ni 合金の変質物, Mg, Al に富む変質物は斜長石の変質物であると考えられる。EH5, EL3 と異なる隕石種, 岩石学的タイプにも関わらずとてもよく似た変質物を有していることから同様の環境, 条件で水質変成が起きたと考えられる。

4. エンスタタイトコンドライトの熱水変成実験結果より酸性, アルカリ性の流体ではなく,

中性の流体が Kaidun 隕石中のエンスタタイトコンドライト岩片の水質変成に寄与した可能性があることが明らかになった。炭素質コンドライトは中性からアルカリ性の流体により変成が起きたと考えられていることから, Kaidun 中に含まれるエンスタタイトコンドライトの水質変成は炭素質コンドライトとやや異なる環境で起きたことが示唆される。

5. Kaidun 隕石には水質変成の起きていないエンスタタイトコンドライト岩片も含まれていることから, EH コンドライト岩片と EL コンドライト岩片がそれぞれの母天体から放出された後, Kaidun 隕石の前駆的な母天体に集積し, そこで水質変成を受けた, もしくは Kaidun 母天体上での部分的な水質変成の可能性が示唆される。

6. 今回研究の行った Kaidun 試料中ではエンスタタイトコンドライト岩片と炭素質コンドライト物質の境界に, 境界に沿った形で方解石が普遍的に存在していた。方解石形成とエンスタタイトコンドライトの水質変成はそれぞれ異なる流体によって最終的に Kaidun 隕石母天体で起こったことが示唆される。

7. 謝辞

本研究にあたって終始熱心にご指導くださった三河内岳教授に深く感謝いたします。

また Michael E. Zolensky 博士には本研究を始めるに際し, 資料提供戴き, また有益なご助言を戴きました。関根康人教授には熱水変成実験を行うに際しご指導ご助言を戴きました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Clayton, R. N., and Mayeda, T. K., 1984. Oxygen isotopic compositions of enstatite chondrites and aubrites. *J. Geophys. Res.* **89**, C245-C249.
- 2) El Goresy, A., Yabuki, H., Ehlers, K., Woolum, D., Pernicka, E., 1988. Qingzhen and Yamato-691: a tentative alphabet for the EH chondrites. *Proc. NIPR*

- Symp. Antarct. Meteorites* **1**, 65–101.
- 3) Goodrich, C. A., Hartmann, W. K., O'Brien, D. P., Weidenschilling, S. J., Wilson, L., Michel, P., and Jutzi, M., 2015. Origin and history of ureilitic material in the solar system: The view from asteroid 2008 TC3 and the Almahata Sitta meteorite. *Meteoritics & Planetary Science* **50**, 782–809.
 - 4) Herwartz, D., Pack, A., Friedrichs, B., and Bischoff, A., 2014. Identification of the giant impactor Theia in lunar rocks. *Science* **344**, 1146–1150.
 - 5) Ivanov, A. V., Skripnic, A. Y., Ulyanov, A. A., Barsukova, L. D., Kolesov, G. M., Kononkova, N. N., 1986. Chemical composition, mineralogy and geochemical characteristics of the Kaidun new meteorite. *Meteoritika* **45**, 3–19
 - 6) Ivanov, A. V., Kononkova, N. N., Guseva, Y. V., 1993. Hydrothermal alteration of schreibersite and metallic iron in Kaidun III meteorite (EH5). *Geochem Internat* **30**, 11–19
 - 7) Ivanov, A. V., Kurat, G., Migdisova, L. F., Brandstätter, F., Kononkova, N. N., 1998. The Kaidun meteorite: Pre- and postaccretionary aqueous alterations of metal in an enstatite chondrite fragment. *Geochem Internat* **36**, 101–106
 - 8) Javoy, M., 1995. The intergral enstatite chondrite model of the earth. *Geophys. Res. Lett.* **22**, 2219–2222.
 - 9) Keil, K., 1989. Enstatite meteorites and their parent bodies. *Meteoritics* **24**, 195–208.
 - 10) MacPherson, G. J., Mittlefehldt, D. W., Lipschutz, M. E., Clayton, R. N., Bullock, E. S., Ivanov, A. V., Mayeda, T. K., and Wang, M. S. 2009. The Kaidun chondrite breccia: Petrology, oxygen isotopes, and trace element abundances. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **73**, 5493–5511.
 - 11) Ohnishi, I., and Tomeoka, K., 2007, Hydrothermal alteration experiments of enstatite: Implications for aqueous alteration of carbonaceous chondrites. *Meteoritics & Planetary Science* **42**, 49–61.
 - 12) Weisberg, M. K., and Kimura, M., 2012. The unequilibrated enstatite chondrites. *Chemie der Erde—Geochemistry* **72**, 101–115.
 - 13) Ziegler, K., Zolensky, M. E., Young, E. D., and Ivanov, A., 2012. Oxygen isotope compositions of the Kaidun meteorites—Indication for aqueous alteration of E-chondrites (abstract). *Lunar and Planetary Science Conference* **43**, #2414.
 - 14) Zolensky, M. E., Bourcier, W. L., and Gooding, J. L., 1989. Aqueous alteration on the hydrous asteroids: Results of EQ3/6 computer simulations. *Icarus* **78**, 411–425.
 - 15) Zolensky, M. E., and Ivanov, A. V., 2003. The Kaidun microbreccia meteorite: a harvest from the inner and outer Asteroid Belt. *Chemie de Erde* **63**, 185–246.

長崎変成岩巡検

金城 亜祐美¹⁾

1) 日本物理探査株式会社 関東支店

1. はじめに

地震学と岩石学は、一見すると異なる分野ですが実は非常に密接な関係があります。地震は、断層破壊を伴う現象のうちの一つです。破壊面の岩石が受けた変成作用を研究することで、すべり(破壊)の特徴を考察する試みが、地震岩石学を中心に活発に行われています。

今回は2018年9月スロー地震学国際合同研究集会開催後に行われた巡検へ参加しました。巡検地は、長崎市北西に位置する長崎市三重と西檜山(Fig.1)です。ここでは水の影響に伴う変成を受けたとみられる変成岩を観察することができます。

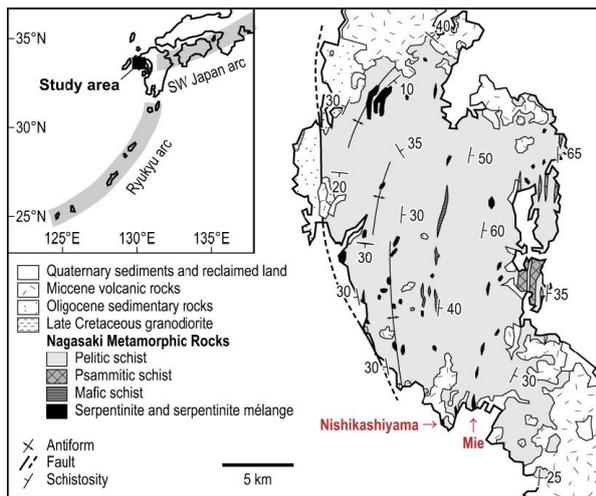


Fig. 1. 北九州・西彼杵半島における三重変成岩と西檜山変成岩の分布 (Mori, 2018).

破壊面に存在する水が、断層間における滑り速度に影響を与えられていると考えられています(Obara and Kato, 2016)。断層破壊が、一瞬で滑る剪断の破壊ではなく低速でずるずると滑る弾性的破壊となる要因と示唆されています(Obara and Kato, 2016)。

今回の巡検の主催であるスロー地震学国際合同研究集会は、普通の地震と比べて比較的ゆっくり滑る地震を研究トピックとして掲げています。今回の巡検地は、スロー地震のような作用に近い現象の痕跡がみられるということで選ばれました。

よって、地震研究における岩石学をめいっばい勉強するいい機会だと思い参加を決めました。

2. 巡検地

2.1 三重メランジュ

初日の巡検ポイントである三重メランジュでは深さ約30 kmでのシアの軌跡を示す変形が見られました。マントルウェッジのかんらん岩由来の蛇紋岩と海洋地殻由来の塩基性変成岩の境界付近では、両者が機械的に混合し(Fig. 2) 基質部は緑泥石-アクチノ閃石片岩(chlorite-actinolite schist; CAS)に変成していました(Fig. 3)。この岩石は、間隙水圧が高かったために剪断変形を受けやすかった(Fig. 4)ことを知りました。このCASは、二つの元となった岩体からは想像のつかないような青緑色をしていて触ってみた感触も表面がツルツルしており変性作用の不思議さを強く感じました。

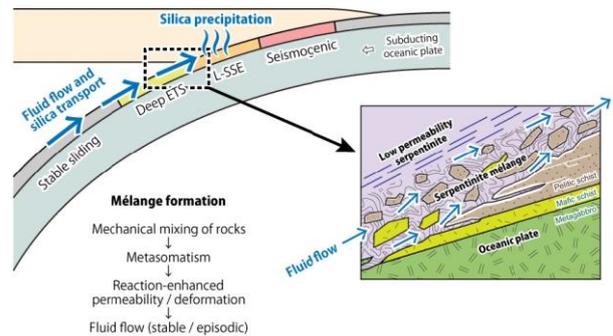


Fig. 2. 長崎変成岩における蛇紋岩形成の地質的環境 (Mori, 2018).



Fig. 3. 三重メランジュの蛇紋岩. (A) 二つの塩基性変成岩体(右上と左上)を伴う Block-in-matrix 構成と、褶曲した曹長岩-塩基性変成岩体がアクチ

ノ片岩により巻き込まれるようす。(B) (A)内の母岩(緑閃石片岩)に含まれる, 褶曲(Drag-fold)した曹長岩の層。(C) 機械的に混合した曹長石とアクチノ閃石片岩。(D) 混ざって変成がみられた曹長岩, 蛇紋岩, そして泥質変成岩。(A)と(B)は Nishiyama et al. (2017) から引用。

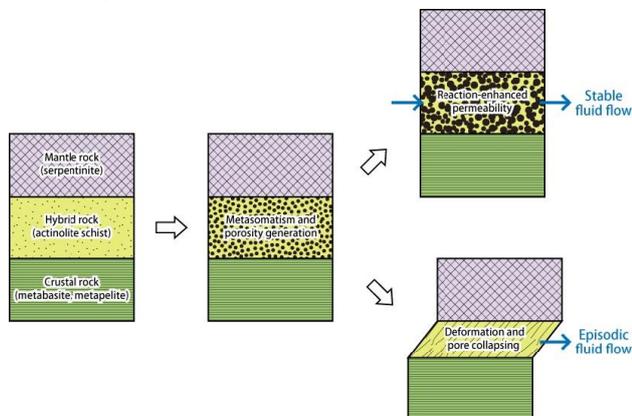


Fig. 4. 蛇紋岩メランジュ内での流体の動きを表した予想図解 (Mori, 2018).

2.2. 西檜山メランジュ

二日目の巡検ポイントの西檜山メランジュでは, 視点を変えてシアの向きや構造を観察しました。はじめに露頭に近づいて基質の CAS を観察しその後それを直接指で触れてみました。なぞる方向によって摩擦の大きさが違うことを手触りでとらえることができました。次に, その場から一歩離れて露頭全体の様子を観察しました。CAS の摩擦が方向によって異なることを使って, CAS とその周辺の岩石に働いていたシアの方向を考察したりしました (Fig. 5)。実際の露頭からプレート境界部の動きを想像するのは非常に興味深い経験でした。

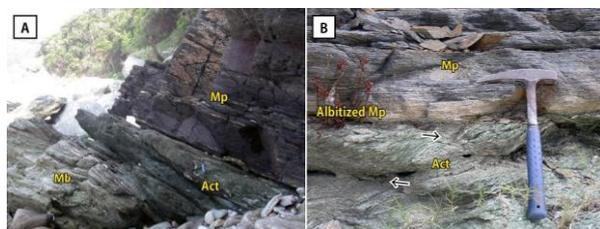


Fig. 5. 西檜山の蛇紋岩メランジュの写真 (A) 塩基性変成岩により相互隔離した泥質変成岩(上部)とアクチノ片岩。(B) 泥質変成岩の接面でみられるアクチノ片岩基岩のそう長石化作用。

3. おわりに

今回の巡検での最大の収穫は, 水がスロー地震の滑りにどのように影響しているのかを実際の岩石を見てイメージできたことです。スロー地震が

発生する際に, 水が影響しているのではないかとされる事例は度々あります。例えば, 遠地地震の表面波が到来した際, 体積膨張時に深部低周波地震・微動が誘発されることが知られています。これは, 間隙水圧増加と大きく関与している (Miyazawa et al., 2006) のではないかとみられています。私も遠地地震による誘発低周波地震を研究対象としていたため, 琉球海溝側のプレート間やトラフ側の熱水域周辺で誘発低周波地震が発生した場合には熱水活動による誘発の可能性を考えています。今回の巡検テーマは岩石からの脱水反応による変成作用がメインであって, 低周波地震が誘発される際の流体の関与とは異なる話でした。しかしながら, 実際に蛇紋岩や片岩といった岩石に触れることで, 水は岩石や亀裂といった様々な場所で物理化学的な影響を強く与えながら循環しているという実感を持つことにつながりました。

また, 今回の巡検は参加者が多様なこともあり大きな刺激にもなりました。参加者には国内外からの専門の異なる先生・学生・また社会人などが参加していました。他分野の方と巡検を共にすることは, その専門の方がどのようなことに疑問を持つのか, また同じ専門の方がどういったことに着目しているかなど勉強になる良い機会になりました。さらには, 地質学は自身の専門と異なる分野でしたが, 同じ地球科学分野として意識的にもフィールドに出て新たな発見を得る機会を積極的に作る必要を感じる巡検となりました。

参考文献

- Miyazawa, M., & Mori, J. (2006). Evidence suggesting fluid flow beneath Japan due to periodic seismic triggering from the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Geophysical Research Letters*, 33(5). doi:10.1029/2005gl025087
- Mori, Y. (2018, May 17). Field Trip to Serpentinite mélanges in the Nagasaki Metamorphic Rocks, Kyusyu, Japan. Retrieved May 17, 2018, from <https://sites.google.com/site/wssloweqs2018/field>
- 西山 忠男. (2017). 開いた系における変成反応と物質移動の解析: 特異値分解法の新しい応用. *地質学雑誌*, 123(9), P. 717-731.
- Obara, K., & Kato, A. (2016). Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. *Science*, 353(6296), 253-257. doi:10.1126/science.aaf1512

琉球列島における遠地表面波によって誘発された低周波地震

Low-Frequency Earthquakes along the Ryukyu Islands Triggered by Teleseismic Earthquakes

金城亜祐美¹⁾・中村衛²⁾

1) 日本物理探鑛株式会社 関東支店

2) 琉球大学地震学研究室

1. はじめに

日本を含む世界各地の沈み込み帯では、様々なスロー地震(ゆっくり地震)が発生している。スロー地震とは、通常の地震よりも長い時定数で生じる滑り現象の総称で、その時定数は約1秒から長いものでは0.5-5年に及ぶ場合がある(Obara and Kato, 2016)。その中で、地震波によって誘発されたLow-frequency Earthquake (LFE)の検出を、琉球列島周辺を対象に試みた。LFEとは比較的高周波成分に卓越したスロー地震であり、遠地地震の表面波通過により生じる数キロパスカル程度の非常に小さな応力に対応して活動が変化する外的応力感性をもつ(Miyazawa et al., 2008; Obara and Kato, 2016)。琉球列島でも表面波による誘発LFEsの発生がChao et al.(2016)によって報告されている。しかし、Hinetのようなボアホール型高感度地震観測網が整備されていない南西諸島では微弱な信号であるLFEを検出するのは極めて困難であると考えられていたため、その発生位置や誘発条件など、誘発LFEsの詳細については解明されてこなかった。しかし気象庁が地上に設置した短周期地震計の記録を見ると、遠地地震の表面波通過時にLFEとみられる信号が含まれていた。そこで気象庁の地震波形を利用して、遠地地震の表面波によって誘発したLFEの発生位置とその発生条件を明らかにした。

2. データと解析方法

解析には、琉球列島に設置された気象庁地震観測網の短周期地震計20点と、防災科学技術研究所F-netの広帯域地震計6点を利用した(Fig. 1)。2004年1月から2016年12月の間に沖縄(那覇)から1000 km以上離れた地点で発生したマグニチュード7.5以上の遠地地震50個を利用し(Fig. 2)、誘発LFEsの有無を調べた。

次に、これらの条件を満たしたイベントの中で表面波到来時にLFEが発生しているものを探した。広帯域地震波形に0.02-0.05 Hzのバンドパスフィルタをかけて表面波到達を確認し、それとは別

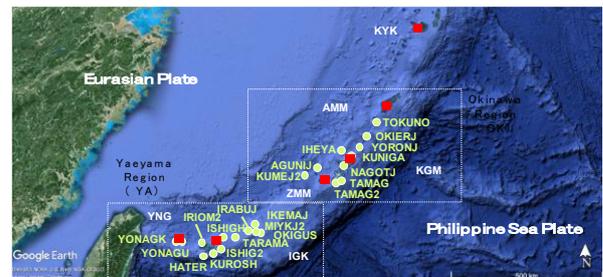


Fig. 1. Distribution of seismic stations. 20 of Short-period seismograph (JMA) (Green circles) and 6 of Full Range Seismograph Network (F-net) Broadband seismograph (NIED) (Red square).

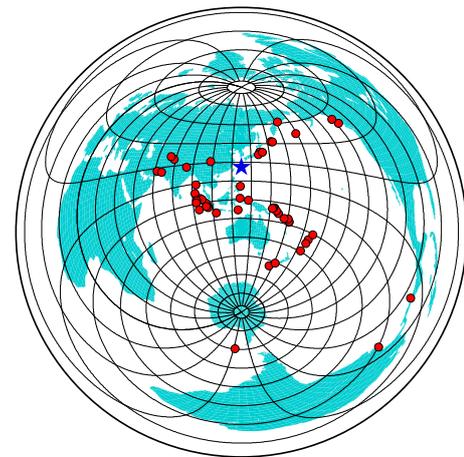


Fig. 2. Distribution of Teleseismic Earthquakes. 50 teleseismic events (red circles) ($M_w > 7.5$) from January 2004 to December 2016, whose epicentral distances were over 1000 km away from Okinawa Island (blue star).

に2-8 Hzのバンドパスフィルタをかけて表面波通過時にLFEの地震波到達が見られるか目視により確認した(Fig. 3)。さらに、LFEの震源決定を行った。2観測点で観測された波形のエンベロープの時間差を相互相関により求めた(Envelope correlation method)(Obara, 2002)。得られた時間差を2点間のS波の到達時間差として、Grid-search Method(Chao et al., 2013)を利用して誘発LFEsの震源決定を行った。

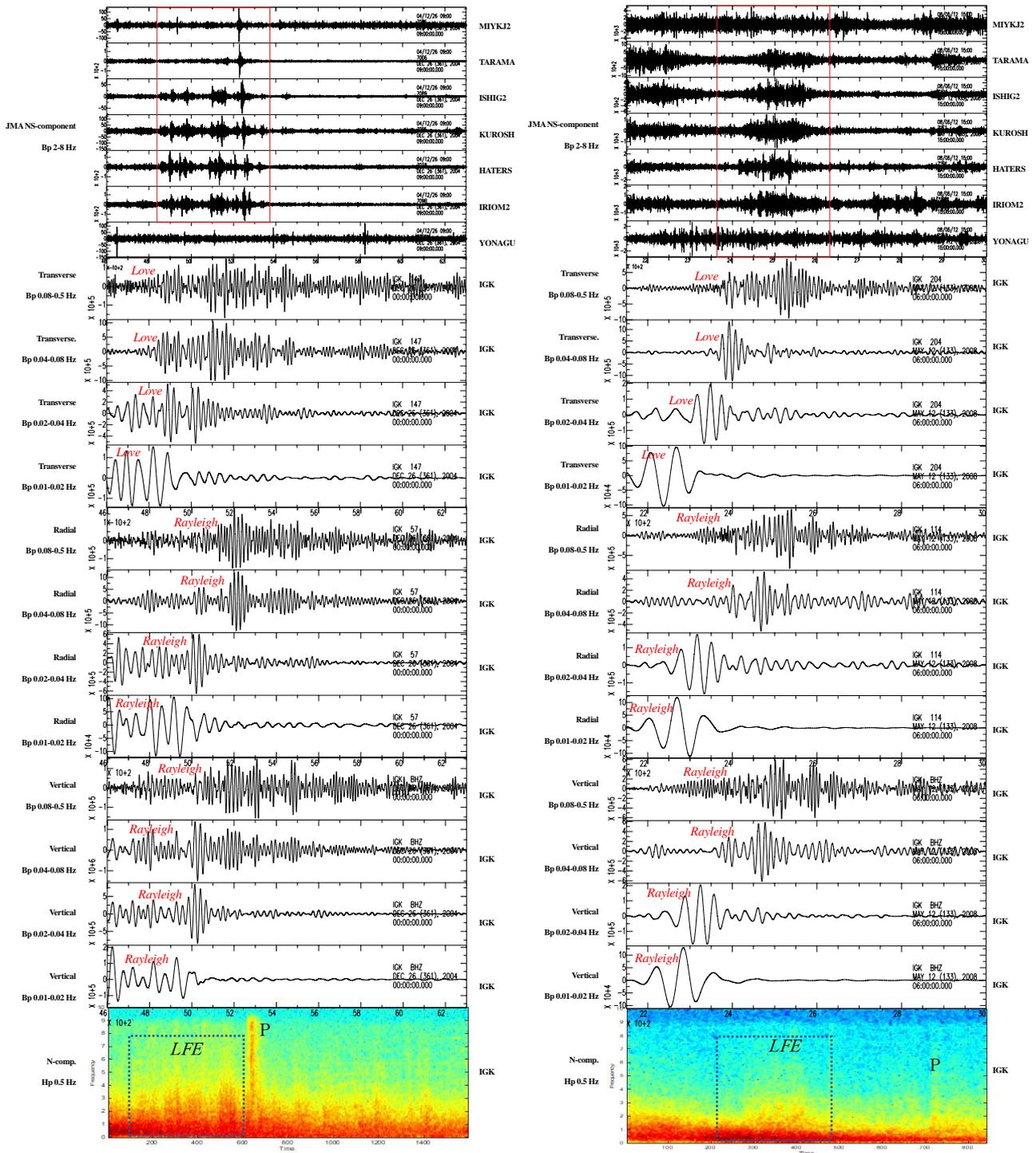


Fig. 3. Mw9.1 2004 Off the west coast of northern Sumatra Earthquake in Yaeyama Region (Left) and Mw7.9 2008 China Sichuan Earthquake in Yaeyama Region (Right). Their triggered LFEs, the all surface waves with different frequencies, and the spectrum of the LFE. The red and blue box represents with the triggered LFEs and labeled 'P' represents the body waves on the spectrum.

求めたLFEの震源のなかには、遠地地震の実体波やローカルで発生した普通の地震をLFEと誤認識したことがある。このようなイベントは地震カタログを用いて除外した。また、LFEが表面波で誘発される条件を調べるため、遠地地震表面波が琉球列島に入射する方位角を調べ、LFE発生の有無と比較した(Fig. 4)。さらに広帯域地震波形に0.01-0.02 Hz, 0.02-0.04 Hz, 0.04-0.08 Hz, および0.08-0.5 Hzのバンドパスフィルタをかけ、異なる周波数の表面波との対応を比較した。(Fig. 3)。

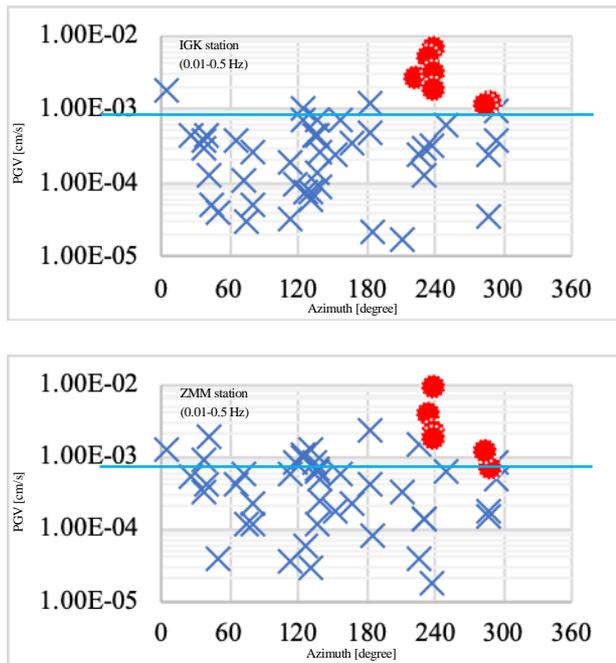


Fig. 4. The ground velocity (cm/s) of the surface wave versus arrival azimuth in vertical component for the frequency range between 0.08-0.5 Hz, observed at Yaeyama (Top) and Okinawa (Bottom). Red solid triangles and black crosses represent the events which triggered the LFEs and did not triggered LFEs. The horizontal line represents the threshold of the peak amplitude which triggered the LFEs.

3. 結果

50個の遠地地震の中で、LFEを誘発した地震は6イベントあった。また、周波数帯が0.01-0.5 HzのLove波およびRayleigh波の振幅が大きいときにLFEが発生する傾向が見られた(Fig. 3)。また、誘発LFEは表面波最大振幅が 5.0×10^{-3} m/sを越えるときに発生する傾向があった。このことは、誘発LFEは表面波によるdynamic stress changeが一定値を超えた場合に発生していることを意味している。いっぽう、誘発LFEの表面波入射方向依存性は確認されなかった(Fig. 4)。震源決定の結果、LFEは八重山諸島と沖縄本

島の琉球海溝側に分布していた。八重山諸島では南東海域および西表島周辺に、沖縄本島では南部にそれぞれLFEが散在して分布していた(Fig. 5)。

4. 考察

誘発LFEの位置は、超低周波地震に伴って発生する低周波地震(VLFE-LFE)の発生域に近い(Nakamura, 2017; Fig. 6)。このことはVLFE-LFEの発生する領域の沈み込んだプレート面は表面波通過によるdynamic stress changeでも同様にLFEを発生させていることを意味している。また、誘発LFEに見られたしきい値の値は台湾で報告されたしきい値とほぼ同じ値である(Chao et al., 2013)。このことは、琉球海溝でのプレート面上での摩擦特性が台湾衝突帯でのLFE発生場の摩擦特性と似通っている可能性があることを示している。誘発LFE発生には入射する表面波の方位依存性は見られなかった。しかし、南西諸島の場合、特にM9に近い遠地地震の到来方向が南西方向に偏っていた。あらゆる方位からまんべんなく地震波が到来したわけではないことによる影響が除去できないため、方位依存性がある可能性は否定できない。

さらに、群発VLFE発生中はゆっくりとした滑りが継続中のために固着状態が比較的弱くなり、LFEを誘発しやすい可能性がある(Chao et al., 2013)。しかし、八重山諸島では、遠地地震による誘発LFEの発生率は群発VLFE発生中とそれ以外の時期とで変化していなかった。しかし沖縄本島周辺では群発VLFE発生中に誘発LFEが発生する率が増加していた。沖縄本島ではVLFEの潮汐応答が見られており、八重山諸島よりも弱い応力変化でVLFE-LFEが発生しやすい傾向がある(Nakamura and Kakazu, 2017)。つまり、八重山諸島よりも沖縄本島周辺のほうが、外的応力に敏感な摩擦特性である可能性があることを示している。

5. まとめ

琉球列島では、遠地地震により低周波地震の誘発がFnet広帯域地震計とJMA短周期地震計の連続波形の両方を利用することで確認された。LFE誘発は、レイリー波とラブ波の両方ともにみられた。とりわけ、中～高周波(0.04-0.05 Hz)に卓越した表面波による誘発が、低周波(0.01-0.02 Hz)によるものよりも多くみられた。また、VLFE発生時期にLFE誘発が増加したことから、プレート間の固着状態が、LFE誘発に影響をもたらす可能性を示していた。

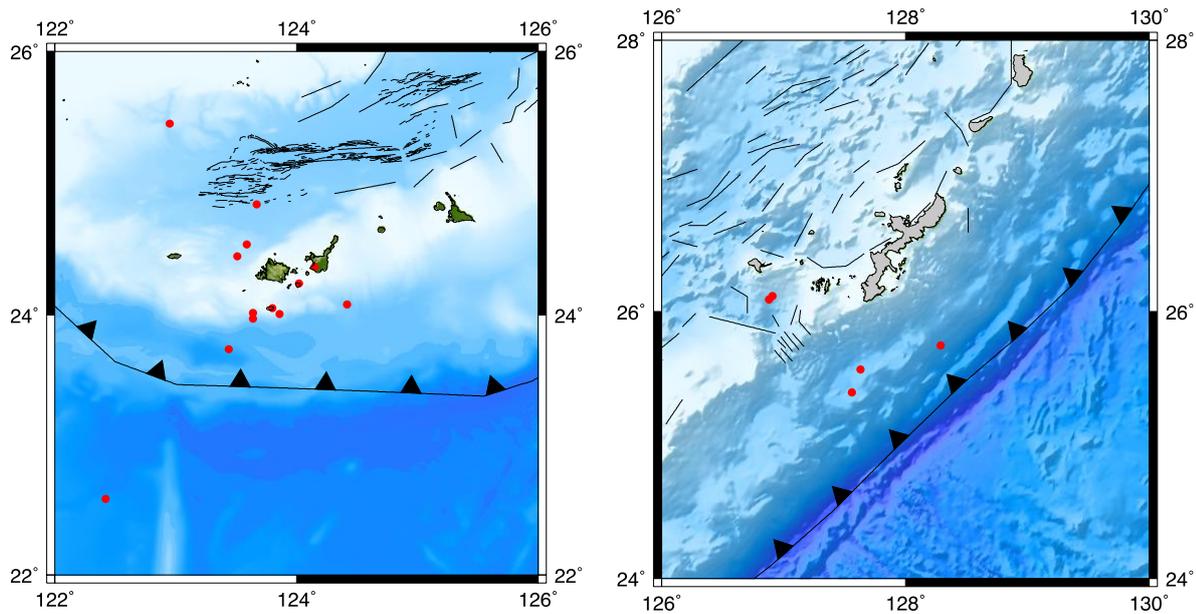


Fig. 5. Hypocenter distribution of the triggered LFEs in the Yaeyama (Top) and Okinawa (Bottom) region. The hypocenter distribution of the triggered LFEs (red dots) by the teleseismic earthquakes. The solid lines show the faults in the Okinawa Trough. The bold line with solid triangles shows the Ryukyu Trench.

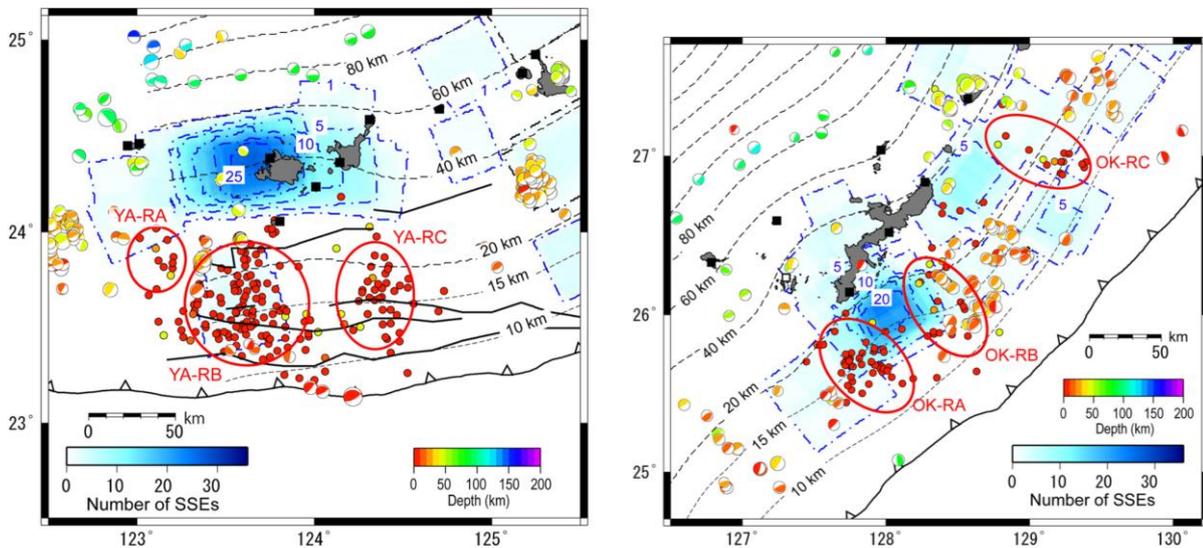


Fig. 6. Distribution of the LFEs accompanying the VLFs (VLFE-LFEs) and that of triggered LFEs. Comparison of the distribution of LFEs accompanying with the VLFs (LFE-VLFs) (red circles; Nakamura, 2017). Blue hatched areas show slow slip events (SSE) faults (Nishimura, 2014).

参考文献

- 1) Chao, K, Peng Z, Huizar, H.G., Aiken C, Enescu B, Kao H, Velasco AA, Obara K, Matsuzawa T (2013). A global search for triggered tremor following the 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103:1551–1571. doi:10.1785/0120120171
- 2) Miyazawa, M., Brodsky, E. E., & Mori, J. (2008). Learning from dynamic triggering of low-frequency tremor in subduction zones. *Earth, Planets and Space*, 60(10). doi:10.1186/bf03352858
- 3) Nakamura, M. and Kakazu, K. (2017). Tidal sensitivity of shallow very low frequency earthquakes in the Ryukyu Trench. *Journal of Geophysical Research (Solid)*, 122(2), 1221-1238. doi:10.1002/2016JB013348.
- 4) Nakamura, M. (2017). Distribution of low-frequency earthquakes accompanying the very low frequency

earthquakes along the Ryukyu Trench. *Earth, Planets and Space*, 69(1). doi:10.1186/s40623-017-0632-4.

- 5) Obara, K. (2002). Nonvolcanic Deep Tremor Associated with Subduction in Southwest Japan. *Science*,296(5573), 1679-1681. doi:10.1126/science.1070378.
- 6) Obara, K., & Kato, A. (2016). Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. *Science*, 353(6296), 253-257. doi:10.1126/science.aaf1512.

テラザイムによるトリチウム水処理の可能性についての検討

赤丸悟士¹⁾, 内田篤貴²⁾, 久永哲也²⁾

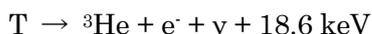
- 1) 富山大学研究推進機構水素同位体科学研究センター
2) 日本物理探鑛株式会社

1. はじめに

土壌や地下水の油汚染の浄化に対して適用されるバイオレメディエーションは、油に汚染された土壌に対して、油分を分解できる自然環境から採取された複合微生物群を混ぜ合わせ、その微生物の力で油汚染の分解除去を行う方法である[1,2]。敷地外への土壌の搬出が必要なく、また自然環境由来の微生物を利用することから、低コストかつ低環境負荷の工法として知られており、主に欧米で油汚染の除去に係る事例が数多く報告されている。油分の分解に係る機構は多様な微生物の組み合わせで成り立っていると考えられており、それを反映して多様な油分に対して効果が確認されている[1,2]。

バイオレメディエーション用に開発されたテラザイム (TerraZyme) は、自然環境から採取された複合微生物群を粘土鉱石に吸着させた材料である[3]。水に入れることで微生物群が活性化され、油分を分解した後に生物群は死滅する。これまでテラザイムの適用は、有機物汚染が対象であった。テラザイムに吸着する微生物群の多様性は、有機物分解の過程を複雑にしており、そのため意図しない反応により有機物以外の汚染物の処理にも適用できる可能性は残されている。

本研究では、テラザイムによる無機汚染物処理の適用可能性を検討する。対象となる無機物として、今回は福島第一原子力発電所の事故に伴い多量に発生した汚染水である、トリチウム水に対する検討を試みた。トリチウム水とは、水分子 (H_2O) の水素 (H) がトリチウム (T) に置き換わった HTO (あるいは T_2O) を含む水のことであり、トリチウムは H の同位体 (質量数 3) であり、容易に H と置き換わる。また、トリチウムは放射性核種であり、以下の式に従い壊変する。



ここで、 e^- は電子、 ν は反ニュートリノである。壊変により生ずるエネルギーは電子と反ニュートリノに分配され放出され、結果 β 線 (電子) のエネルギーは最大 18.6 keV、平均 5.7 keV の連続スペクトルを描く。この最大エネルギーは β 線放射性核種の中でもかなり小さく、 β 線の飛程は空気中で 5 mm、水中で 6 μm とかなり短い。そのため、GM

計数管などの一般的な放射線検出器では十分にトリチウムを計測できず、トリチウム水から放出される放射線量の測定は液体シンチレーション計測法が主となる。液体シンチレーション計測法による測定では、日本の法律で規定されているトリチウム水の排水基準 60 Bq/cm³ はもちろん、1 Bq/cm³ のトリチウム水も容易に検出可能であり、トリチウム計測に適した手法である。今回は、1 kBq/cm³ 程度のトリチウム水を用いて、テラザイムを投入することでトリチウム水の濃度がどのように変化するかを液体シンチレーション計測法で調べた。またこの結果より、トリチウム水の処理に対するテラザイムの適用可能性について検討した。

2. 方法

2.1 試験手順

1.3 kBq/cm³ 程度のトリチウム水をガラス瓶に 300 ml 程度準備した。本実験で用いたすべてのトリチウム水はこの瓶から分取した。また、分取後必要に応じて H_2NO_3 あるいは NaOH を用いた pH 調整、あるいは栄養剤の添加を行った。

20 ml ガラス容器に所定量のテラザイムを計量採取し、攪拌子を入れた後、分取・調整したトリチウム水を 9.5 ml 添加した。対照実験を行うため、テラザイムの基材である粘土鉱物 (モンモリロナイト、以下 Raw Clay) を、テラザイムと同量入れた試料を同様に準備した。

準備した試料は、攪拌子を用いて 72 h 攪拌を続けた。攪拌中テラザイムが容器の底に溜まるのを避けるため、1 日に 2 回程度手で容器を振とうした。攪拌中は温度を特にコントロールせず、室温のまま行った。

攪拌終了後、ガラス容器内の溶液を全量遠沈管に移し、遠心分離を行った。遠心分離にて得られた上澄み溶液 0.5 ml を分取し、14.5 ml の液体シンチレータと混合した。その混合溶液中のトリチウム量を、液体シンチレーションカウンター (LSC) にて計測した。測定は各試料に対して 10 分計測を 3 回行うサイクルを 2 サイクル回した。蛍光などの影響を小さくするため、測定結果は 2 サイクル目の値のみを使用した。

2.2 評価手順

本文中に示した測定結果は 3 回の計測の平均値であり、遠心分離後に分取したトリチウム水の質量で規格化した比放射能（単位は Bq/g）である。また放射壊変による減少を考慮し、一つの図表の中に示されている比放射能は、半減期を 4500 日として、同じ日時での濃度となるよう測定値を補正した値を示した。なお、pH 調整や製剤の添加などトリチウム水の希釈を伴う調整を行った場合は、希釈後の溶液を再測定した値を処理前のトリチウム水の比放射能として示した。

液体シンチレーション計測により得られた値のばらつきを以下のように評価した[4]。放射線計測においては、計数値 x は真の値 x_0 を中心として正規分布し、その正規分布の持つ標準偏差は $\sigma = \sqrt{x_0}$ とかける。 x は x_0 に近い値 ($x = x_0$) として、単位時間当たりの計数である計数率 n ($= x/t$, t は測定時間) を用いると、 n とその標準偏差 σ_n は、

$$n \pm \sigma_n = \frac{x}{t} \pm \frac{\sqrt{x}}{t}$$

と表される。ここでの測定値は全てこの式に従う形で、標準偏差を測定の誤差として取り扱った。この誤差の値は図中のエラーバーとして示し、エラーバーが重ならない場合に、有意の差があると判断した。

3. 結果

3.1 テラザイム量の影響

はじめに、pH7 のトリチウム水を用い、テラザイム（または Raw Clay）量の異なる試料について、テラザイムを入れる前後のトリチウム濃度の変化を検討した。結果を図 1 に示した。試料を入れる前のトリチウム水のトリチウム濃度は 1277.3 ± 2.1 Bq/g であった。テラザイム 0.2 g をトリチウム水に入れ、3 日間攪拌した後のトリチウム水の濃度は 1282.0 ± 2.9 Bq/g となり、攪拌前と比べ有意な変化は見られなかった。テラザイム量を 0.6 g に増やすと、攪拌後のトリチウム濃度は 1272.7 ± 2.9 Bq/g となり、0.2 g のテラザイムを入れた時と比べわずかに小さくなった。しかし、試料を入れる前の値と比べると、有意な変化は見られなかった。1.0 g のテラザイムを入れ攪拌した後のトリチウム濃度は 1261.0 ± 2.9 Bq/g となり、攪拌前と比べ明らかに減少した。0.2 g, 0.6 g の値と比較すると、攪拌後のトリチウム濃度はテラザイムの添加量の増加に伴い減少しているといえる。

Raw Clay を入れ攪拌した際のトリチウム濃度は、テラザイムを同量入れて攪拌した場合のトリチウム濃度と比べて、すべて標準偏差の範囲内に

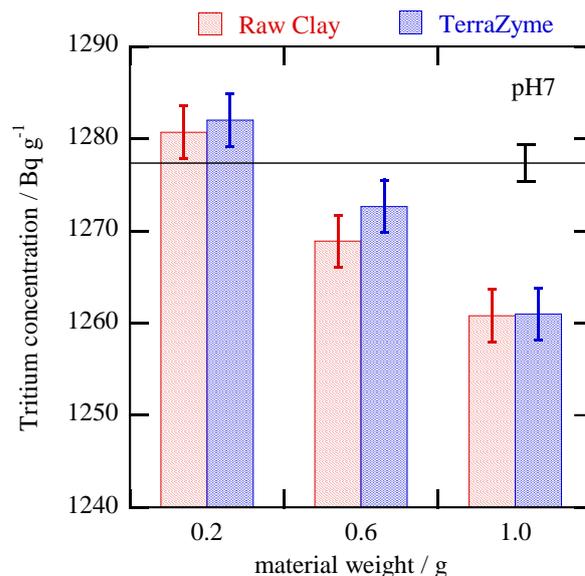


図 1 テラザイム量の異なる試料のトリチウム濃度変化。図中の黒線は攪拌前のトリチウム濃度、エラーバーはトリチウム濃度測定時の標準偏差を示す。

収まり、両者の値に有意の差は見られなかった（例えば、1.0 g の Raw Clay を入れ攪拌した後のトリチウム濃度は 1260.8 ± 2.9 Bq/g となり、同量のテラザイムを入れた場合とほぼ同じ値）。これより、テラザイム内の微生物によるトリチウム濃度の変化は無かったといえる。

テラザイム量の増加に伴うトリチウム濃度の減少について考察する。テラザイム量の増加に伴うトリチウム量の減少は、Raw Clay においても同じように起こっていることがわかる（図 1）。また別の実験から、この濃度低下はテラザイムを入れ攪拌を始めたのち速やかに完了し（1.5 h 以内）、それ以上時間をかけてもトリチウム濃度は低下しないことがわかっている。それらを考え合わせると、テラザイム量に比例したトリチウム濃度の低下は、テラザイムの基材である Raw Clay 内の結晶水あるいは表面吸着水が水中のトリチウム（水）と交換して、結果トリチウム水を希釈したためと推察される。つまりテラザイムの主成分である Raw Clay の影響であり、テラザイム量の増加に伴うトリチウム濃度の減少は、微生物由来の現象ではない、と結論した。

3.2 トリチウム水の pH の影響

トリチウム水の pH の影響を調べるため、pH4 あるいは pH10 のトリチウム水を調整し、同様の検討を行った。その結果を図 2 に示した。pH4 と pH10 のどちらの場合でも、pH7 での検討（図 1）と同様に、添加したテラザイム量が増えるに従い

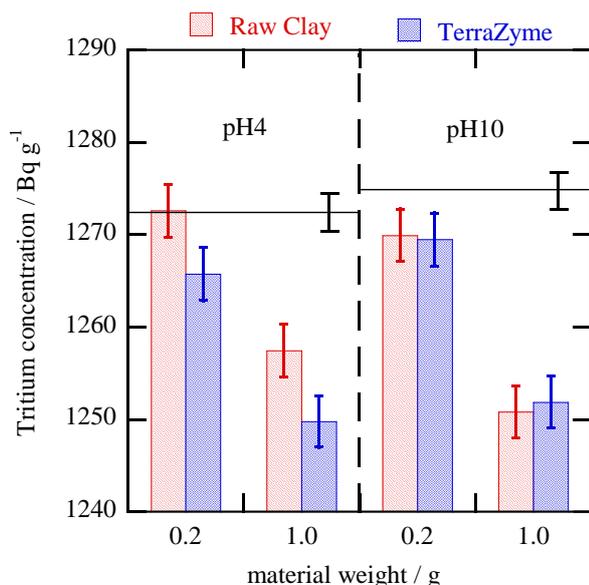


図2 トリチウム水の pH が異なる場合の、攪拌後のトリチウム濃度。図中の黒線は攪拌前のトリチウム濃度，エラーバーはトリチウム濃度測定時の標準偏差を示す。

トリチウム濃度が低下した。これは前述したテラザイムの基材による希釈効果である。

テラザイムあるいは Raw Clay を入れて攪拌した後のトリチウム濃度を相互に比較すると、pH10 では両者に有意な差は見られなかった。一方、酸性側 (pH4) での結果は、1.0 g のテラザイムを入れた場合が 1249.8 ± 2.9 Bq/g、1.0 g の Raw Clay を入れた場合が 1257.5 ± 2.9 Bq/g となり、Raw Clay と比べてテラザイムを入れた場合のトリチウム濃度が低い値を示した。これは添加量を 0.2 g に減らしても同様の傾向を示した。

酸性側でのトリチウム濃度の減少について考える。仮に、テラザイムがトリチウム処理に効果を示しているとする、添加剤の量に対する依存性、つまり添加量が多くなればトリチウム濃度の減少幅も大きくなると思われる。しかし、テラザイムと Raw Clay の比較においてテラザイム量に対するトリチウム濃度の依存性はほぼ見られなかった (テラザイム添加と Raw Clay 添加のトリチウム濃度の差は、0.2g 添加では 6.9 Bq/g、1.0g 添加では 7.7 Bq/g であった。テラザイム量を 5 倍に増加しても、トリチウム濃度の減少幅はほとんど変化していない)。つまり、現在までの検討では、テラザイムによるトリチウム濃度の減少を見ているとは断定できず、さらに再現実験を繰り返し、有意の値であることを確認する必要がある。また、現状で見られる pH4 でのテラザイムと Raw Clay のトリチウム濃度の差はかなり小さい (添加材の違いに

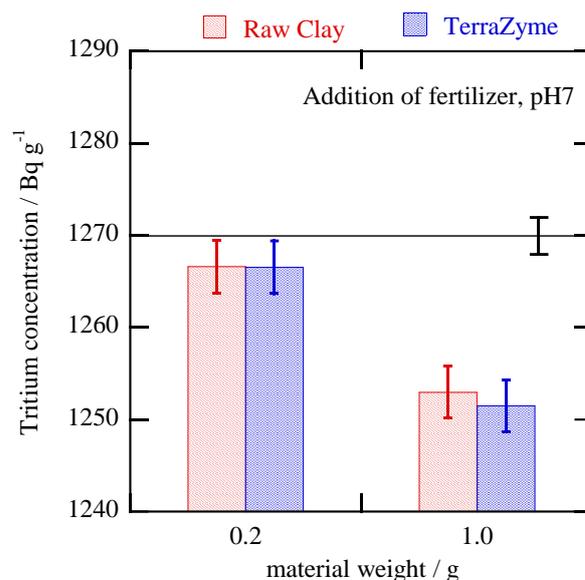


図3 トリチウム水に栄養剤を添加した場合の、攪拌後のトリチウム濃度変化。図中の黒線は攪拌前のトリチウム濃度，エラーバーはトリチウム濃度測定時の標準偏差を示す。

よるトリチウム濃度の違いは、1.0g 添加、pH4 でも 0.7%) ことから、これらの値の検討には計量時の誤差等も考慮した慎重な検討が必要である。

3.3 栄養剤添加の影響

ここまでの結果からは、トリチウム水に対するテラザイムの影響はほとんど見られなかった。この要因として、テラザイム内の微生物の活性化が十分ではないと考えた。そこで、トリチウム水に栄養剤を添加し、攪拌中に微生物をより活性化させた状態でトリチウム水に対する効果を調べた。トリチウム水は pH7 とした。栄養剤を添加して攪拌した後のトリチウム濃度を図 3 に示す。テラザイムの添加量が増加するに伴い、トリチウム濃度は低下した。これはこれまでの結果と同様、基材である Raw Clay による希釈効果である。テラザイムと Raw Clay とを比較すると、添加量 0.2 g、1.0 g の両方の場合で、トリチウム濃度に有意の差は見られなかった。つまり、栄養剤添加による効果は見られず、これまでの結果は微生物の活性の度合いが影響しているわけではない、といえる。

4. まとめ

本実験ではテラザイムに含まれる微生物がトリチウム水処理へ適用できる可能性について検討した。テラザイムをトリチウム水に加えて攪拌すると、攪拌後のトリチウム濃度は攪拌前と比べ減少した。その減少幅は、試料の量に比例していること

から、テラザイムの基材である Raw Clay に含まれる水分の希釈効果であると考えられた。テラザイムと Raw Clay それぞれを添加して攪拌した際のトリチウム濃度を相互に比較すると、両者にほとんど違いは見られず、結局トリチウム水に対するテラザイムの効果（微生物の作用によるトリチウム濃度の変化）については確認できなかった。つまり検討した条件下（試料量、pH、添加剤の有無）では、トリチウム処理への適用の可能性は低いことが示された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、公益財団法人大田区産業振興協会の岩片 啓氏、市川 徹氏には、産学連携の橋渡しをしていただきました。研究の実施に際しましては、富山大学研究推進機構水素同位体科学研究センター長である、阿部孝之教授に快諾いただきました。また、株式会社バイオレンジャーズの鴻野雅一社長、岩橋さおり氏には、バイオ製剤の提供ならびに助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

本研究は日本物理探査株式会社からの受託研究として行われました。

参考文献

- 1) 株式会社バイオレンジャーズ環境コンサルティング部, バイオオーグメンテーションによる油汚染の浄化: 複合微生物製剤「オッペンハイマー・フォーミュラ」の適用, 産業と環境, 2012.9, 61-64.
- 2) 呉 方芳, 神谷 修, 藤田 豊久, 大好 直, 微生物を用いた油汚染土壌の浄化に関する基礎的研究, 素材物性学雑誌, 15 (2002) 59-65.
- 3) 株式会社バイオレンジャーズ HP, <https://www.bri.co.jp/product/index.html> (2019.6.1時点).
- 4) 飯田博美 編, 「放射線概論」第五版, 通商産業研究社, 2001年.

編集後記

令和という新しい年号を迎えてからはや1か月が経過いたしました。自然現象に目をむけますと、火山活動の活発化や迫りくる南海トラフ地震等の自然災害に思いをはせる時、防災減災のための調査の重要性を痛感しております。

今号は、東北大学の佐藤先生に不発弾探査について、防衛大学の正垣先生に地盤工学における性能設計について、琉球大学の松原先生には岩石の風化についてそれぞれ執筆していただきました。また、富山大学に委託研究をお願いしましたトリチウムを含む地下水の浄化実験についても赤丸先生にまとめていただきました。

皆様のお時間のある折にお目を通していただければ幸いです。

企画本部 内田

地質工学 第16輯

令和元年6月12日発行

編集 日本物理探鑛株式会社 企画本部

印刷所 前田印刷株式会社

NGP 日本物理探鑛株式会社

本 社 〒143-0027 東京都大田区中馬込二丁目 2 番 12 号 TEL 03(3774)3211 FAX 03(3774)3180
URL : <http://www.n-buturi.co.jp>
E-mail : gijutsu@n-buturi.co.jp

東 関 東 支 店	〒310-0804 水戸市白梅三丁目 10 番 5 号 コーラルトップ 108	TEL 029 (231) 7315 FAX 029 (231) 7316 E-mail : mito@n-buturi.co.jp
関 東 支 店	〒143-0027 東京都大田区中馬込二丁目 2 番 12 号	TEL 03 (3774) 3161 FAX 03 (3774) 9353 E-mail : kanto@n-buturi.co.jp
札幌営業所	〒060-0061 北海道札幌市中央区南 1 条西 16 丁目 1-323 春野ビル 3F	TEL 011 (558) 3121 FAX 011 (558) 0900 E-mail : sapporo@n-buturi.co.jp
東北営業所	〒980-0021 仙台市青葉区中央四丁目 8 番 15 号	TEL 022 (393) 4155 FAX 022 (393) 4156 E-mail : tohoku@n-buturi.co.jp
埼玉営業所	〒336-0021 さいたま市南区别所 5-15-2	TEL 048 (700) 3184 FAX 048 (700) 3100
千葉営業所	〒273-0011 船橋市湊町 2-12-24 湊町日本橋ビル 6F	TEL 050 (6861) 3024 FAX 050 (6865) 6843
神奈川営業所	〒221-0856 横浜市神奈川区三ツ沢上町 7-8 ジュネス 203	TEL 045 (550) 4865 FAX 045 (314) 6499
北 陸 支 店	〒950-0983 新潟市中央区神道寺三丁目 11 番 19 号	TEL 025 (241) 2960 FAX 025 (241) 2959 E-mail : hokuriku@n-buturi.co.jp
中越営業所	〒940-2011 長岡市藤沢二丁目 7 番 6 号	TEL 0258 (22) 4617 FAX 0258 (22) 4618
中 部 支 店	〒465-0094 名古屋市名東区亀の井二丁目 134 番地	TEL 052 (753) 9662 FAX 052 (753) 9664 E-mail : chubu@n-buturi.co.jp
三重営業所	〒511-0041 桑名市外堀 22 番地 ITO ビル 102	TEL 0594 (32) 7725 FAX 0594 (32) 7726
関 西 支 店	〒543-0033 大阪市天王寺区堂ヶ芝一丁目 3 番 24 号 LN 堂ヶ芝ビル 2F	TEL 06 (6777) 3517 FAX 06 (6773) 5488 E-mail : kansai@n-buturi.co.jp
滋賀営業所	〒520-0246 大津市仰木の里四丁目 13 番 2-204	TEL 077 (574) 2261 FAX 06 (6773) 5488
四国営業所	〒760-0012 高松市瀬戸内町 19 番 25 号	TEL 087 (863) 6191 FAX 087 (863) 6192 E-mail : shikoku@n-buturi.co.jp
中 国 支 店	〒731-0138 広島市安佐南区祇園 3-48-13	TEL 082 (850) 0073 FAX 082 (850) 0080 E-mail : cyugoku@n-buturi.co.jp
九 州 支 店	〒803-0814 北九州市小倉北区大手町 7 番 38 号 大手町ビル 3F	TEL 093 (581) 8281 FAX 093 (581) 8267 E-mail : kyushu@n-buturi.co.jp
福岡営業所	〒812-0016 福岡市博多区博多駅南三丁目 13 番 17 号	TEL 092 (474) 3087 FAX 092 (474) 3107
沖縄事務所	〒904-2154 沖縄市東二丁目 3 番 13 号 メゾンクリオネ 103	TEL 098 (923) 1915 FAX 098 (923) 1916

※NGPはNippon Geophysical Prospecting Co.,Ltd.の略称です。