

巻頭言	顧客満足型の産学連携	岐阜大学産官学融合センター長 岐阜大学工学部教授	八嶋 厚	1
小特集	産学官連携による実用化技術への取組み			
	産学官連携を取り巻く状況		芦田 讓	2
	土木地質分野における共同研究の現状		佐々木靖人	5
	自然に学ぶ環境浄化技術とその事業化	佐藤 努・伊藤健一 福士圭介・池田穂高 平野武嗣・橋本晃一		12
	土砂災害警戒避難支援システムの技術移転		古川浩平	17
	遺跡保存剤の開発とその応用例		豊田昌宏	23
	発破を用いた実物大液状化実験 —港湾・臨海部構造物の耐震性向上に向けて—		菅野高弘 小濱英司	30

顧客満足型の産学連携

岐阜大学産官学融合センター長・工学部教授 八嶋 厚

建設関連産業の顧客は民間事業を除けば「国民である」。しかしながら、地盤調査業者は、計画、調査段階では「行政」を顧客として捉え、また設計、施工段階では「設計者」および「施工者」を顧客として認識してしまう傾向がある。建設関連業界の成果を「顧みてくれる客」は、いつも「国民」である。地盤調査業界においては、満足した顧客とやる気のある技術者が真の唯一の財産である。技術者は、顧客の代理人である行政、設計者、施工者の問題解決者として、対等な立場にあると自覚すべきである。

地盤調査業者の技術者個人の能力向上が唱えられて久しい。技術者は既存の技術だけを習得すればよいのではない。コスト縮減、安全・安心な国土を実現するためには、技術者の属する組織は常に新しい技術を保有もしくは開発しなければならない。技術者個人の能力向上、組織の技術開発が地盤調査業界の活性化に繋がる。それは次のような考えによる。

- 1) 業務の流れの過程で顧客の代理人である行政、設計者、施工者が、地盤に関する諸問題を提示したときに、プロブレム・ソルバーとしての技術者の問題解決能力に信頼を寄せる。それによって、人間関係もより深まる。
- 2) 顧客および顧客の代理人の問題を明らかにすることによって、相手が何を求めているのかがわかる。これを組織の技術やサービスにフィードバックできる。つまり新しい技術開発が必要となる。

この二つの大きなテーマ、「技術者の能力向上」、「新しい技術開発」はどのように達成されるべきであろうか？これについて考えてみたい。

平成16年4月の国立大学法人化の前後から、「産学官連携による産業活性化」といった表題を目にすることが多くなった。「研究成果の活用を促進することを大学の業務とする」ことが法律に明確に位置づけられており、教育と研究といった従来からの大学ミッションに加えて、技術移転を伴う社会貢献が、大学の重要なミッションの一つとなった。したがって、大学における研究シーズのクォリティとは、研究自体の品質と教員の外に向かったサービスであると定義しても過言ではない。製造業、バイオ、ITなどの分野では、大学と産業界が協働で生み出す成功例が新聞紙上に連日にぎわしている。産学官のネットワークがしっかりしている場所ほど投資効果があがっている。建設関連産業で

はどうであろうか？産学官連携は進行しているであろうか？建設関連事業は、古くは業界、行政、大学が密接に連携をとりながら、技術開発、技術者の能力向上に積極的に取り組み、日本の社会基盤の整備を担ってきた。現状はどうであろうか？

建設関連産業が対象としているのは、他の製造業ではあたりまえの均一・均質材料ではなく、地域性に富む地盤である。このことが、地盤調査業の技術の難しきであり、おもしろさでもある。これをおもしろいと感じるところから産業の活性化が進むといっても過言ではない。「おもしろさ」を追求し、これを事業として成立させるためには、絶え間なき技術開発と技術者の能力向上が必要である。このための環境作りを怠ってはならない。建設投資が冷え込む今こそ、業界の躍進のための千載一遇の好機と考え、この機会を逃さずに積極的に行動する勇気こそが必要である。

個別の技術者と大学研究者、個別の会社と大学研究室、このような従来からの産学連携形態は、昨今批判を浴びているが、このような結びつきは決して悪ではない。しかしながら、上記したテーマを達成するためには、個対個の産学連携では不十分であり、組織的つながりを骨格とした産学連携が大切である。幸い、地盤調査業に関心のある大学研究者は、関連する学協会に所属している。地盤調査業者諸兄は、ぜひ全地連という組織を有効に活用して、大学研究者が広く活躍する学協会との連携を模索していただきたい。地盤調査業は長い歴史を持っており、その中に多くの技術の集積がある。それを大学の先端技術や官の研究成果と有機的に結びつけ、新しい産業や技術を興す手伝いをするのが全地連の一つの役割ではないか。産学連携の「学」は大学とは限らない。大学の知を集積している関連学協会との協働も大切である。この種の試みは、組織本部だけでは十分でなく、全地連各支部と関連学協会支部との連携強化を図っていただきたい。その後、支部が位置する周辺大学との組織的連携を進めていただきたい。これからの産学連携は、組織対組織の連携を強化すべきである。大学および関連学協会は、地盤調査業者の能力向上のため、継続教育といった形式で共同作業を進めるだけでなく、顧客のニーズに基づいた新たな技術の実用化研究を組織的に進めなければならない。ローカルな視点に立って、最新のグローバル技術を縦横無尽に使いこなすこと、環境を達成することが、地盤調査業における産学連携ではなかろうか。

産学官連携を取り巻く状況

あしだ ぬづる
 芦田 譲*

1. はじめに

昭和40年代の学生運動の華やかし時には、産学連携ということは口にするのもはばかれたものであった。しかし、ここ数年、特に2004年4月から国立大学が法人化して以来、しきりに産学官連携の動きが加速している。1990年代のアメリカ経済の復興を支えたのは、バイ・ドール法(Bayh-Dole Act)による大学の持つ知的所有権の民間による活用にあるといわれていることから、我が国でも産学官連携の必要性が叫ばれている。ここでは地質・防災分野等に特定せず、一般的な産学官連携を取り巻く状況について概説する。

まず、「産」、「学」、「官」について定義付けする。「産」とは産業界、「学」とは大学を含む学界を指す。「官」には政府および付属機関という意味と公的研究機関を指す場合があるが、そのつど使い分けする。

2. 産学官連携のための法的整備

2.1 バイ・ドール法 (Bayh-Dole Act)

バイ・ドール法は1980年アメリカのBrich BayhおよびRobert Dole両上院議員の提案により成立したもので、大学が公的資金を得て獲得した発明を大学・非営利団体、中小企業に帰属させるにあたって、研究資金提供機関の許可を不要としたものである。さらに特許化してライセンスした時、ロイヤリティー収入を発明者や科学技術の研究開発に還元することを義務付けた。この法の成立により、アメリカの各大学等は技術移転機関(Technology Licensing Organization; TLO)を大学学内あるいは外部組織として設立した。現在ではアメリカのほとんど全ての大学がTLOを持っている。その結果、公的資金を得て大学が取得した特許に関し、大学と企業間でライセンス契約が結ばれ技術移転が図られるようになった。このアメリカのTLOに類似した組織を各国も積極的に展開している。

日本でも、1995年に科学技術基本法が制定され、1998年の大学等技術移転促進法(TLO)をはじめ、産学連携を推

進する政策が講じられた。

2.2 科学技術基本法

科学技術基本法では以下のことを規定している。

- ① 科学技術振興のための方針として、研究者等の創造性の発揮を旨とし、基礎研究、応用研究および開発研究の調和のとれた発展を通じて、科学技術と人間の生活、社会および自然との調和
- ② 科学技術振興に関する国および地方公共団体の責務
- ③ 国および地方公共団体による大学等に係る施策の策定にあたっては、大学等の研究活動の活性化を図り、研究者の自主性の尊重などその研究の特性への配慮の必要性
- ④ 政府に対し、科学技術振興施策を総合的、計画的に推進するため、総合科学技術会議の議を経て、科学技術基本計画の作成の要請。科学技術基本計画の実施のための必要な資金の確保のための必要な措置の実施
- ⑤ 国が講ずべき施策として、多様な研究開発の均衡のとれた推進、研究者等の養成確保、研究施設・設備の整備、研究開発に係る情報化の推進、研究交流の促進の実施

2.3 科学技術基本計画

科学技術基本法に基づき、1996年科学技術基本計画が策定された。基本理念として、新しい知の創出、知による活力の創出、知による豊かな社会の創出を掲げている。以来5年を単位として策定され、政策の継続性に配慮し、時代の趨勢や緊急の課題に対して重点的な施策を講じてきた。第1期(1996~2000年度)では、研究投資の遅れが顕著な大学等のインフラ整備と研究助成に重点が置かれ、17兆円の資金が投入され、第2期(2001~2005年度)では、ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料の4分野に重点を置き、24兆円が投資された。この24兆円という額は、第1期の17兆円の約40%増である。研究開発費のGDP比でみると、第1期では0.67%で、アメリカ、ドイツ、フランス等の0.84~1.03%に及ばなかったが、第2期ではGDP比1%を目指している。これだけの研究開発費を

* 京都大学大学院教授

有効に活用するには、① 総合科学会議の強力なリーダーシップ、② 基本計画に盛り込まれた計画を実現する具体化プランとフォローアップ体制の確立と実行、③ 研究成果の評価制度の確立と情報公開等が必要である。これらについては、2006年からの第3期基本計画に向けて議論がなされている。その中で、地質、物理探査に係るものとして、日本近海海洋資源の開発、海底地震の発生メカニズム解明への貢献を指向した「海底の地形・地質・資源探査システム」の開発を基幹技術として取り上げるべき検討が行われている。

2.4 大学等技術移転促進法 (TLO)

この法律は1998年8月に施行され、大学、高等専門学校、大学共同利用機関及び国の試験研究機関等における技術に関する研究成果の民間事業者への移転の促進を図るための措置を講ずることにより、新たな事業分野の開拓及び産業の技術の向上並びに大学、高等専門学校、大学共同利用機関及び国の試験研究機関等における研究活動の活性化を図り、もって我が国産業構造の転換の円滑化、国民経済の健全な発展及び学術の進展に寄与することを目的とする(第一条)。

TLOとはTechnology Licensing Organizationの略であり、産業基盤整備基金による助成金の交付や債務保証などの支援措置を受けるには、法に基づく承認が必要であり、また特許料等の免除を受けるには、法に基づく認定を受ける必要がある。承認の条件としては、「特定大学技術移転事業の実施に関する指針」では、① 法人格を有すること、② 研究成果の発掘・評価・選別、民間事業者への移転、情報や資金の大学への還流等を責任を持って遂行すること等を定めている。

法人格としては、株式会社、有限会社、民法第34条の規定により設立された社団および財団法人、学校法人その他の法人となっている。2004年10月現在、承認TLOは38機関、認定TLOは4機関にのぼっている。

3. 産学官連携のための仕組み

国立大学等は2004年4月から国立大学法人法に基づき法人化され、人事・会計等における各種の規制が大幅に緩和され、TLOの設立もあり、産学官連携が重要な役割と位置付けられ、活性化することが期待されている。

産学官連携の仕組みとしては、① 共同研究、② 受託研究、③ 奨学寄附金、④ 受託研究員、⑤ 共同研究センター等がある。

また、税制上の優遇措置としては、① 増加試験税制、② 寄附金控除がある。

(1) 共同研究

1983年度に発足したもので、民間企業等の研究者と国立大学の教員とが共通のテーマに対して対等の立場で研究を行うものである。

企業からの共同研究の申込みにより、共同研究契約の締結、企業からの研究費・研究料の納付、企業からの研究員

の派遣、大学教官の企業への出張を通して共同研究が実施される。また、国立大学と民間企業が、それぞれの施設で研究を行う「分担型の共同研究」もある。

(2) 受託研究

民間企業からの委託を受けて国立大学の教員が業務として行う研究である。

企業からの受託研究の申込み、受託研究契約の締結、研究費の納付により研究を行い、研究成果を企業に報告するものである。

(3) 奨学寄附金

学術研究や教育の充実等のために、民間企業や個人などから国立大学が受け入れる寄附金である。さらに、奨学寄附金により、「寄附講座」、「寄附研究部門」を大学に開設することもできる。

(4) 受託研究員

企業等から、現職の研究者や技術者を国立大学等に受け入れて、大学院レベルの研究指導を行い、その能力の向上を図ることを目的としたものである。

(5) 共同研究センター

1987年度から整備が進み、産業界等との窓口として設置され、共同研究の場を提供するほか、技術研修、技術相談、研究情報提供などの活動を行っている。

(6) 増加試験研究税制

民間企業等が国公私立大学と共同研究を行った場合、民間企業等が支出した試験研究費の一定割合が法人税(所得税)から控除される。

(7) 寄附金控除

奨学寄附金は国に対する寄附金として、法人の場合は全額を損金に算入され、また個人の場合は所得の25%まで所得控除できる。

上述した制度的助成等により産学官連携は急速に活性化し、企業が大学へ支出した研究費は図1に示すように平成4年度409億円、平成9年度395億円から、平成14年度には513億円と順調に増加している。この513億円は、企業が社外に支出した研究費1兆5576億円の3.3%であり、20年前に比べると約3.3倍になっている。これを企業の資本金階級別にみると、資本金階級100億円以上の企業が397億円で、全体の約8割を占めている。513億円の内訳を産業別にみると、図2に示すように医薬品工業が53.6%、食品工業が12.9%となっており、これら二つの産業で全体の約7割を占めており、産業別に偏りがみられる。

民間からの連携のアプローチに加えて、国としても(独)科学技術振興機構の各種制度を通じて連携を積極的に推進している。平成11年度から平成16年度にかけて全体で約1000億円の援助を行っている。

(独)科学技術振興機構の事業には、科学技術創造立国の実現を目指して① 新技術の創出に資する研究、② 新技術の企業化開発、③ 科学技術情報の流通促進、④ 研究交流・支援、⑤ 科学技術理解増進等のプロジェクトが組まれている。そのうち新技術の企業化開発を目指した、研究成果最適移転事業には、大学などの先端的研究成果について戦略的な権利化を促進する「成果育成プログラムA(権利

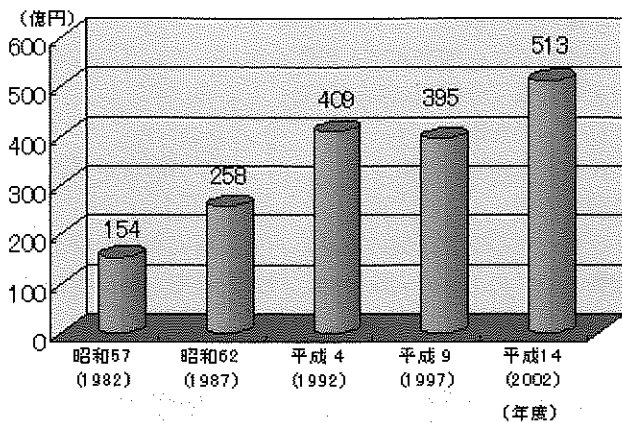


図1 企業が大学へ支出した研究費の推移

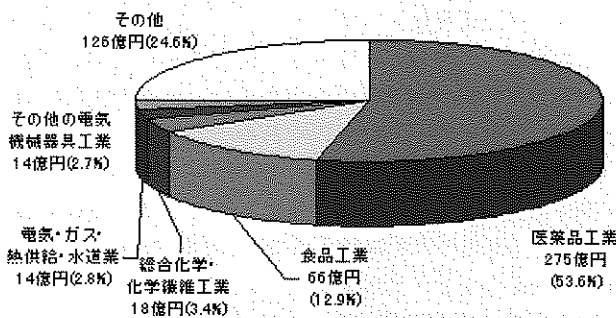


図2 企業が大学へ支出した研究費 (産業別) (平成14年度)

化試験)」と大学、独立法人試験研究機関等の研究成果を具体的な形とする「成果育成プログラムB (独創モデル化)」は注目に値する。(独)科学技術振興機構のパフレットによると、これらは以下のように述べられている。

(1) 成果育成プログラムA (権利化試験)

これは大学、国公立試験研究機関等で生まれた研究成果のうち、実用技術への展開が期待できる基本的特許が出願されているものに対して、実用技術への展開に向けて必要な試験を実施し、基本的特許に関する周辺特許などの知的財産権を取得し権利化を図るものである。具体的には、① 課題提案者である研究リーダーが権利化試験構想に基づき、若手研究者、企業技術者などと試験チームを組んで2年間を限度とする試験を実施する。② 基本的特許に関する周辺特許などの取得に必要な試験を実施し、得られた成果に

ついて特許出願をする。③ 試験費は権利化試験に直接必要となる、設備費、材料費などの研究経費、若手研究者、企業技術者などの人件費、旅費などを対象とし、課題あたり年平均2000~3000万円である。

(2) 成果育成プログラムB (独創モデル化)

これは大学、国公立試験研究機関等の研究成果に基づいて生まれた産業を生み出す可能性などがある技術的な概念や製品構想を、(独)科学技術振興機構、研究開発型中堅・中小企業、大学、国公立試験研究機関等(研究者)が協力して、試作品として具体的な形とすることや実用化に向けて必要な可能性試験等(モデル化)を実施することにより育成するものである。すなわち、モデル化により企業化開発に移行するために必要なデータを取得し、その後の新技術の実用化を促進し、新産業の創出に寄与するものである。具体的には、① 大学等の研究成果(特許等)を試作品化(モデル化)、② 研究開発型中堅・中小企業(資本金10億円以下)より申し込む(公募)、③ モデル化資金は1課題につき2000~3000万円である。

4. 終りに

これまで施行されてきた科学技術基本法およびそれに基づく科学技術基本計画、さらに大学等技術移転促進法等の一連の科学技術振興政策および産学連携推進政策と国公立研究機関および国立大学の独立法人化、国立大学法人化により、規制緩和が進み、産学連携は社会的な認知を得たと考えられる。具体的には、大学では、外部資金獲得意思、社会への説明責任の認識を促している。また、企業では、大学の知的所有権の活用情報源の確保、基盤技術の蓄積に対して積極的なアプローチがみられる。

しかしながら、いくらいい制度、組織を作っても、結局のところ中に所属する人間の意識が重要になってくる。産学官連携の重要性、意義を認識し、一步一步着実に成果を示し社会的な認知を得ることが必要である。

参考文献

- 1) 総務省統計局統計：トピックス No.7 進む「研究の産学連携」。
- 2) (独)科学技術振興機構：平成16年度パフレット。
- 3) 原山優子編著：産学連携，東洋経済新聞社，2003。

土木地質分野における共同研究の現状

さ さ き やす ひと
佐々木 靖人*

1. はじめに

近年、産学官連携による共同研究や技術開発が盛んである。土木地質分野においても共同研究がやや増加傾向にある。成果への近道として、お互いの不足部分を補うことは必要であり、共同研究の増加は望ましいことである。

土木地質分野は多岐にわたるため、共同研究の全貌を把握することは困難であるが、ここでは、主に土木研究所で実施している共同研究の事例を紹介し、またいくつか他機関の状況等についても参照しつつ、共同研究の現状を述べる。また、筆者の経験にもとづき、土木地質分野における今後の共同研究のキーワードやあり方についても述べたい。

2. 土木地質関係の共同研究制度と研究状況

まず、共同研究の制度と研究状況について、いくつかの研究機関にヒアリングした。ただしこれはごく個人的なつながりによるヒアリングであり、また研究内容によってはオープンにできないものもあるため、ヒアリングされていない土木地質関係の研究所があることや、記述に具体性がない面についてはご容赦願いたい。なお、一般的な共同研究制度として文部科学省の科学研究費による研究などがあり、各組織でもよく行われているが、これについては自明のものとして割愛した。

2.1 土木研究所の共同研究制度と研究状況

(1) 土木研究所の研究制度

まず土木研究所（以降土研と称する）の共同研究について紹介する。制度としては、土研提案型と民間提案型がある。独立行政法人化する前は土研提案型のもののみであったが、近年は民間提案型の共同研究も行うようになった。土研提案型の共同研究には、① 土研と指定機関、② 土研と公募、③ 土研・指定機関・公募、という3つの組み合わせがある。指定機関とは、特に必要な技術を持つとして土

研が共同研究相手に指定した機関である。一方、民間提案型とは、特に独創的かつ画期的で国民の利益となるような技術を民間が提案し、民間単独（ないし他の指定機関、公募等による機関が参加することがある）と土研が実施する研究である。この場合、土研の役割は、現場普及に向けて残された技術的課題や技術行政的課題を民間とともに解決し普及へ道筋をつけることである。なお、土研提案型・民間提案型いずれの場合にも、必要に応じて共同研究者が土研内で交流研究員として共同研究業務に従事することが可能である。

また、このような共同研究制度とは別に、委託・受託研究制度や、共同研究後の新技術の普及を支援する研究コンソーシアム体制などもある。

このような共同研究は、土研側提案の新規課題がある場合に土研側からホームページや「土木技術資料」などの業界紙で公募等がなされる。民間提案型については、土研の技術推進本部で随時受け付けている。このほか、国際的な共同研究も行われているが、これは通常の共同研究とは異なる手続きである。

共同研究の成果は、「共同研究報告書」にまとめられるのが一般的であるが、そのほか、書籍として出版することもある。土木研究所でも法人出版が行われており、いくつかの出版がなされている。たとえば地盤関係では最近、「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル」などが土木研究所編集として出版されているが、これも共同研究などの成果である。なお、通常の研究と同様に共同研究の成果も最終的には関係団体等に意見照会の後、内容の一部を国土交通省の通達や基準、指針、要領、場合によってはJIS原案などに採用する場合もある。

また、このような成果活用の流れ以外に、普及を図る目的で、土研関係のさまざまなイベント（土研ショールーム、一日土研など）や国土交通省関係の技術研究会、新聞や業界紙等においても技術紹介されることがある。

(2) 地質関連の共同研究の状況

筆者の所属する地質チームでは、民間提案型の共同研究は現在のところ実施していない。土研提案型の共同研究としては、「地形地質的視点に基づく生態系への環境影響の予測・軽減技術に関する共同研究」、「GISを活用した道路斜

* 独立行政法人土木研究所，材料地盤研究グループ地質チーム
 上席研究員

面のリスク評価に関する共同研究」,「岩石に由来する環境汚染に関する共同研究」等を実施している。また最近までは、「活断層の位置および規模の定量的認定法に関する研究」を実施していた。これらの共同研究をごく簡単に紹介すると以下のとおりである。

「地形地質的視点に基づく生態系への環境影響の予測・軽減技術に関する共同研究」は、生態系保全や自然再生などに、地盤（地形・地質・土質・地下水など）の視点を活かす具体的な手法や手順を提案しようとする研究である。地盤と生態系の関係性を研究する学問として「地生態学」という分野があるが、本共同研究はこの地生態学を工学的に応用しようという立場であることから、研究内容を総称して「応用地生態学」や「地生態工学」と呼んでいる。共同研究者は、土研のほか大学・コンサルタント・建設会社の多様な複合となっている。この共同研究では最終的に生態系保全のための地盤調査技術・影響予測技術・対策技術などをとりまとめて「(仮称)生態系保全のための地盤の調査と対策」といった啓蒙的な書籍を作ろうと考えている。

「GISを活用した道路斜面のリスク評価に関する共同研究」は、道路斜面のweb-GISデータベースシステムやハザードマップ作成手法等を確立し、道路斜面管理の高度化を図ろうとするものである。この研究ではすでに共同研究報告書として「道路斜面ハザードマップ作成要領(案)」,「道路斜面防災GIS標準仕様書(案)」,「道路斜面防災GISデータ整備標準仕様書(案)」,「航空レーザー計測による道路斜面基図作成要領(案)」などの成果が得られており、このほかにも、いくつかの面的な地形地質調査手法、崩壊確率の予測手法、土砂崩壊・岩盤崩壊における到達範囲予測プログラム(SLSS, HEMなど)を開発している。今後は、さらにこれらの成果を現場の実際の管理に活かせるように作業を行っている。

「岩石に由来する環境汚染に関する共同研究」は、岩石から自然に溶出する重金属による汚染への対策技術を検討するものである。現在、既往の鉱山位置などを表示した「重金属汚染リスクマップ」を作成したところであり、今後はリスクの高い箇所土木工事を実施する際の地質調査方法や溶出試験法、危険度の評価方法、対策手法などについてとりまとめていく予定である。

「活断層の位置および規模の定量的認定法に関する研究」は、調査者によって判断がまちまちな「活断層の地形判読」という問題に対して、客観的な抽出が可能となるように、活断層の抽出にあたって重要な地形要素等を明らかにし、記載方法の標準化、判読による活断層の確実度の客観的判定方法の開発等を行う研究である。これまでに「活断層の地形要素と判読」,「主に山岳地域における活断層地形判読の基本的考え方と記載方法」などの共同研究報告書をまとめており、すでにこれらの成果は、ダムの活断層判読に活かされている。

以上のように、これらの共同研究は通常、土研と民間(地質コンサルタント、建設会社など)、ならびに、大学など、数団体~10数団体がメンバーとなっている。また、道路斜面防災の研究においては、共同研究とは別に大学への委託

研究を実施しており、さらに共同研究等に関連して、民間から交流研究員を受け入れている。

また、地質関係の国際的な共同研究としては、韓国建設技術研究院(KICT)との道路斜面リスク等に関する共同研究や、フランス中央土木研究所(LCPC)との斜面災害リスク、地震災害リスクほか、地盤全般に関する研究協定などが行われている。

(3) 民間提案型共同研究の不足

ところで、土研の主たる役割は従来から、一つの新技术を普及させるというよりも、むしろある包括的な目的(たとえば土木分野における防災のための活断層調査の高度化と指針化)に向けて一定レベルの技術提案を行うことに重点が置かれてきた。そのため共同研究も、技術力がありかつ今後この関係の業務を行う可能性のある団体とともに技術を持ち寄って行われ、数団体~10数団体程度の大組織の陣容となっているのが特徴である。このような土研提案型の共同研究への参加者は、技術指針策定の一翼を担い、その過程に参加することで、技術の動向を把握することができ、また自社の技術を維持・向上させることができる。場合によっては自社の技術を指針に取り入れることもできる。土研提案型の共同研究はこのような網羅的なメリットを有している。

一方、民間提案型の共同研究は、開発した技術を迅速かつ広く普及させることで、開発者の直接的利益に結びつくというメリットがある。土研提案型共同研究は中長期的な利益、民間提案型の共同研究は、短期的な利益に関わっているといえる。

これらのどちらに共同研究の重点が置かれているかといえば、少なくとも土研提案型の研究を行うのが行政的な優先事項であったため、民間提案型については、これまでやや消極的であったと思う。それに加えて、実際に土木地質関係では民間提案型の共同研究案件がこれまで全くなかったということも、民間提案型共同研究が行われていない原因である。材料関係などの分野では民間提案型が頻繁に行われているが、材料関係では、土木分野で認められることで急速に普及が進むことが考えられるのに対し、土木地質関係の新しい技術の場合、多くは物理探査技術のような地質調査技術であろうから、技術が認められたとしてもそれほど急速に普及が進むという性質のものではないことも事実であろう。しかし、新しく優れた地質調査技術であっても、現場の中で認知されるためには、個々の技術マニュアルを整備するだけではなかなか普及しない。最終的には、たとえば斜面防災分野や道路防災分野といった現場に直結した分野の調査指針やマニュアル類(河川砂防技術基準(案)、道路土工指針、といったもの)の中に盛り込まなければ、土木の現場の中では、いつまでたっても特殊な地質調査技術としてしか見なされない。たとえば筆者と共同研究者は土研提案型の共同研究の中で、航空レーザー計測による斜面の詳細地形計測技術について技術マニュアル(共同研究報告書)を作成したが、このような有効な技術は、最終的には上記のような現場向けの指針・マニュアル類に盛り込む必要があると考えている。そのために上記共同研

究の中では、いくつかの現地計測実験を行って、斜面に対するさまざまなデータ取得条件とデータ精度の検討を行った。いずれにせよ、土研全体でも100件近い民間提案型の共同研究が行われていることを考えると、土木地質関係でも、この種の民間提案型の新しい技術の共同研究提案がなされることを望みたいところである。

2.2 他の土木地質関連の研究所の共同研究制度と状況

(1) 北海道開発土木研究所

北海道開発土木研究所（以降、開土研と称する）でも共同研究は同様に行われているようである。研究項目も北海道に特徴的な岩盤斜面崩壊に関するものや、重金属汚染に関するもの、新技術による地質調査やモニタリング技術に関するものなど、土木地質に関するさまざまなテーマをカバーしており、共同研究相手方も、(独)農業工学研究所、北海道立地質研究所、大学、民間など多彩とのことである。ただし研究スタイルは、開土研と1団体という形式が多いようである。これは、土研が近年実施し始めている「民提案型」に近いスタイルと考えられる。総じて個別技術の普及においては、小グループの方が効率的でインセンティブも働くものと思われる。開土研の場合は北海道という地域性があり、地域に密着した技術や地域育成型の技術開発を行う必要があるためもある。

(2) 産業総合研究所

産業総合研究所（産総研）はとりわけ産学官の連携において充実した制度を有しており、連携・知的財産の活用を図るため同様の制度を有しているほか、独立した組織（連携研究体）をつくって共同研究を行う制度なども有している。これらの共同研究は、「産学官連携コーディネータ」という役割の方がコーディネートする。この他にも産学官連携コーディネータは、関連業界等との懇談会や意見交換会を実施して多方面の連携を維持している。なお、ヒアリングによると、産総研内のグループ研究（たとえば「都市地質」といったくりのプロジェクトグループ）自体が、プロジェクトごとにメンバーをテンポラリーに集めてなされる共同研究的なものであり、その点で共同研究は日常的手段ということができるとのことである。このような日常的手段としての共同研究は、まず第一に研究者一人一人が独立して個人研究する体制と能力をもっているからこそフレキシブルに組織できるものであろう。

(3) 電力中央研究所

電力中央研究所では、ヒアリングによると、特に受け入れや申し入れの制度はなく個別対応であるが、担当者レベルで合意に至れば共同研究締結を行い、所内規定に沿って進められるとのことである。国内外を含めていくつかの共同研究が行われているようである。

(4) その他

その他の土木地質関係の研究所として、東京都土木技術研究所、(財)地域地盤環境研究所、(独)防災科学技術研究所、(独)農業工学研究所、(財)鉄道総合技術研究所、北海道地質環境研究所、および民間の研究所などがある。ほとんどの機関は共同研究制度を備えているか、実質的に実施

できる体制があるようである。

2.3 大学の共同研究制度と研究状況

大学でも同様の産学連携を行っている（ただし大学では何故か「産学官」ではなく「産学」連携という呼称を用いているところが多い。できれば「官」も交えてほしいところである）。

たとえば東京大学では産学連携のための産学共同研究センター（CCR: Center for Collaborative Research）という組織がある。そのホームページを見ると共同研究や受託研究などのいくつかの制度が制定されていて、共同研究の問い合わせに応じるほか、産学連携テーマの大学側提案課題が1,400件以上も列挙されており、興味ある共同研究について問い合わせできるようになっている。実は筆者も先日初めてこのホームページを開いた（ヒアリングした東京大学の教員も、あまり開いたことがないようである）が、土木地質関係では、斜面崩壊や岩盤崩壊、地下水、物理探査など多様な提案課題をみることができている。なお、ヒアリングによると、同大学の地球工学関係でも、国・県・特殊法人・財団法人・民間等を対象に数件以上の共同研究が実施されているようである。

同様な産学連携センターは他の土木地質関係の大学でも作られている。たとえば島根大学産学連携センターでは、平成16年度の土木地質関係の共同研究として、「のり面情報化技術の構築」（総合理工学部横田修一郎教授）などの情報をホームページに掲載している。

2.4 土木地質分野における共同研究状況のまとめ

以上のように各機関の状況を俯瞰すると、量的には他分野に比べやや少ないようではあるが、いずれの機関もそれなりの共同研究を行っているようである。

制度としては、一つの機関が外部に向けて提案するもの、ある機関に他者がアクセスして提案するもの、複数の機関が合同で提案・実施するもの（科学研究費もこれに含まれる）などがある。

共同研究の内容については、オープンにできない研究などもあり全体的な傾向を俯瞰することはなかなか困難である。しかし全般的に見ると、社会のニーズを反映して、防災関係（地震防災、斜面防災など）、環境関係（土壌汚染、地下水汚染、地下水量や地下水位、各種廃棄物、環境アセスや生態系保全など）、維持管理関係（老朽化構造物の点検や管理、のり面などの防災に関わる構造物管理やモニタリング、構造物情報管理など）のテーマが多くなっているように思われる。

なお、個別に紹介はしなかったが、共同研究に関連して問題となる研究資金調達や人材の交流についても、各機関とも制度を充実させてきている。以前は産学官の資金融通などは行い難かったが、現在は、産総研や大学など、かなり自由にできるようになっている機関が多い。ただし土木研究所は過去のトンカチ官庁の名残で、共同研究者への関連業務の発注や研究資金のやりとりは原則禁止であり、これが研究の進捗にとって足かせになる場合が多い。本来は、

人材や技術が豊富だが研究資金の不足しがちな大学や民間と一緒に研究する場合、産総研のような「連携研究体」的な組織を作り、共同研究、委託研究・受託研究などの複合的な業務をその中で実施できる体制が望ましいと思う。重要なのはその中で研究資金・人材・労働負担、ならびにそれによって得た利益などの分配に対する対外的な透明性を確保すればよい。

3. これからの共同研究

前章では共同研究の現状を俯瞰したが、断片的なヒアリングであり、また筆者の能力からしても、今後必要とされる共同研究を述べることは到底できない。しかしここでは、土木地質分野において、留意点、あるいは今後のキーワードと考えられるいくつかの点について述べてみる。

3.1 技術行政機関どうしの連携とアピール

産学官の連携のみが叫ばれているが、官と官の連携が意外に少ない。特に技術行政に関わる研究所どうしが連携することで、省庁の枠を越えた共同研究を行っていく必要がある。たとえば地震時の防災施策立案について、関係する技術行政組織（たとえば土研、国土地理院、産総研、防災科学技術研究所など）が連携し、学産とともに存在感のある提案をしていく必要がある。

3.2 国民のニーズに合う研究

研究そのものが誰のニーズによるものかよく考える必要がある。とりわけ、行政的なニーズだけでなく、国民が直接必要としているニーズを敏感に受け取る必要がある。このような視点は土木地質分野では特に不足しているのではないかと思う。

また、その際の共同研究相手も検討する必要がある。たとえば、景観法や自然再生推進法などは、地域、住民、NPOなどが積極的にコミットしていくことによって地域づくりできる体系になっているが、このような分野においては、必ず科学的な視点も必要とされている。このような分野に土木地質関係者も関与して共同研究を行ったり、共同研究相手として地域住民やNPOとの連携を行ったりしていく必要もある。

3.3 世界のニーズに合う研究

日本だけでなく世界的に共通の緊急課題（たとえば災害、環境、貧困、紛争等に起因する問題など）を重点的に取り上げ、その解決に向けた目標設定を行い、またそのような研究体制で望む必要がある。このことは、技術の活用という観点から見ても、パイが大きく有効なことである。

3.4 新たな枠組み提案型の技術開発

行政の新たな枠組みを案出するような共同研究を提案する必要がある。たとえば土研では自然由来の重金属汚染についての共同研究を行っているが、これによって今後は、現場での直前対応や事後対応だけでなく、土木計画時点に

おいて体系的な事前チェック体制が必要とされるようになる。おそらく環境影響評価の際などにおいても体系的に対応することが必要になるだろう。このように単に個別技術を向上させることだけでなく、この研究によって行政の計画・制度・体制・今後の行動などが大きく変わるような提案をしていく必要がある。

3.5 データの蓄積と利用

土木地質分野では、さまざまな地盤情報があり、それらの多くは眠っているか数年後に廃棄されている。これらの地盤情報を体系的に蓄積・解析・情報発信するような共同研究が必要である。たとえばデータベースとしてはボーリングDBのほか、土木地質図DB、調査試験（物性）DB、地盤評価DB、地下水関係のDB、地盤災害DBなど多様であり、ボーリングデータや一部の調査試験（物性）DBを除くこれらのほとんどはデータベース化されていない。このようなデータベースは収集・解析するだけでなく、付加価値の高い加工情報とすること、またその情報を広く発信することが重要である。たとえば、同業者用の土木地質図などだけでなく、他分野や国民向けの防災マップ、地盤環境マップなどとして発信していくのが土木地質分野のアピールにもなる。このようなデータベースは単一機関では収集してもそれほど量の量にならないし、多様なユーザー向けの加工情報の作成は一つの機関では実施しがたいものであるため、共同研究などのような連携した研究形態で検討すべきである。

3.6 近未来のテーマ

当たり前のことであるが、現在の問題だけでなく、将来問題となることを研究する必要がある。たとえば維持管理や福祉に関わる課題は、近未来というよりは今後すぐに問題となる「せっぱつまった」テーマではあるが、近未来により深刻になることが明らかな問題でもある。

このほか、現在は経済的に厳しいため環境や景観的に高品質の土木基盤を作ることはなかなかできない状況であるが、西洋のように成熟した社会になれば必ず、現在はやむを得ない安普請な土木基盤をどうにかしたいと思うようになるだろう。そのためのために、高品質で景観的に優れた土木基盤を作る技術や、防災と環境の調和した土木基盤を整備する技術などが必要になる。いわば「わがままな要求」であるが、このような要求を満たしてきたのが技術開発であり、今後このような要求を満たすための具体的な手順を提案していく必要がある。

3.7 調査精度の向上

これも当たり前のことであるが、地盤の調査・評価技術については、調査精度・評価精度の向上が重要である。調査精度が向上することで、単に抜けのない調査が行えるとか、全体コストが低減するといったメリットだけでなく、これまで全く予想しなかった付加価値が生じることもある。たとえば航空レーザー計測により高精度の地形把握が可能になれば、超微地形と生態系の関係性を活用した生態

系保全技術といった新しい視点が生まれる可能性もある。

また、ダムなどでは横坑やコアボーリング主体の調査が行われているが、これも再検討が必要であろう。かつて岩盤が不良な箇所は横坑で調査するのが重要であったが、最近では良質なコアが採取できるようになり、横坑よりもやや安価に岩盤状況がわかるようになった。さらに近年、ポアホールカメラは、コアではわからない開口亀裂などの情報を把握することができる故に活用が広まった。今後は、コア採取せずに、きわめて安価に孔をたくさん掘削して、各種の孔内計測を行った方が良い箇所もあるだろう。このような調査のバリエーションを増やす技術開発も必要であろう。

3.8 新しい発想の基礎研究

2.1(3)項でも述べたが、土木地質分野では新しい発想による新技術を育てるような共同研究が不足している。また、基礎的な技術を取り上げて長期的に育成する共同研究についても、土研を含めて必ずしも多くないと思われる。しかし大学などでは、豊富な基礎技術が生まれている。たとえば、岩盤が破壊するときに発生する電磁波をとらえて岩盤崩壊などの予測を行う技術（東京大学 CCR における大久保誠介教授の提案テーマ）などは、実現可能かどうかを含めて検討する価値のあるテーマであろう。

このような基礎技術は、土木地質分野以外にあることも多いだろう。視野を広く持ち、大学などとも密に交流して、官側のニーズを理解してもらったり、逆に発想の種（シーズ）を紹介してもらったりしながら、これらの基礎技術を育てるような共同研究を働きかけていく必要がある。

4. よりよい共同研究を行うために

さて、前章までは関係団体の共同研究制度と状況を俯瞰するとともに、これから望まれる共同研究のキーワードを整理した。各機関とも充実した共同研究制度があること、また、その制度を活用してさまざまな研究が行われている現状が把握できた。

しかし重要なのは、効率的に研究成果を上げていくことであり、この点は制度というよりも、研究者としてのノウハウに負うところが大きいであろう。このようなノウハウについては、今回は現状を把握することができなかった。しかし、実はこのようなノウハウを最も知りたいと思うところである。おそらく各研究者とも、効率的に成果を上げるために色々な工夫をしていることと考える。

そこで以降は、蛇足ながら、共同研究を効率よく進めるためのノウハウ、あるいは望ましい共同研究環境というものを考えてみたい。これにより、よりよい共同研究を進めるヒントが得られ、共同研究の今後のあり方にもつながると思うからである。

4.1 共同研究の目的と倫理

共同研究に限らず、研究の目的には次のようなものがある。

- ① 新たな発想を作り出す。
- ② 難解・複雑な問題を解決する
- ③ 発想の種（シーズ）を実用化する。

また、研究に関連して重要なこととして以下の点がある。

- ④ 効率的に研究を進める。
- ⑤ 研究結果を迅速に普及する
- ⑥ 組織（個人）をPRする（副次的効果）

共同研究は、①～③だけでなく、④～⑥のような目的も含め、複合的な効果をねらって実施されることが多い。

ただし土木分野では⑤や⑥のような目的がきわめて大きな位置を占めることがあり、真の意味の共同研究といえるのか首をひねる事例も散見される。これらは、広義には共同研究と呼ばれているものの、実際は新技術普及促進のための共同体（コンソーシアム）といった方が適切であろう。もちろんこのような共同作業も重要ではある。

なお、当然のことであるが、共同研究は結果として共同研究者全員がハッピーにならなければならない。特定の個人や団体、あるいは立場の弱い個人や団体に過剰の負荷を強いるものであってはならない。共同研究者が上記①～⑥のような目的を達成することでどれだけ利益や幸福を享受できるかに常に配慮し、それに相応した作業分担がなされなければならない。共同研究においても（であるからこそ）、倫理的な部分は十分配慮されねばならないし、そのような部分を制度化・明文化しておくことが重要であろう。

4.2 共同研究において望ましい環境

ここでは、共同研究を「複数の人間や複数の組織が共同して一つの課題に対して研究を行うこと」と定義し、共同研究において望ましい環境を考察する。なお、上記の定義にしたがえば、一つの職場や研究室内で、2名以上で研究する場合も、一種の共同研究といえる。このように定義するのは、複数の組織での研究も実際は人と人との議論の中で進むものであり、事務手続き上の差はあれ、複数の人間での研究と複数の組織での研究には過程において何ら変わるものがないからである。

さて、以降は多少雑談的になるが、研究目的を実現する上で、共同研究という手法が効果を発揮しやすい環境を、4.1節に挙げた主な研究目的に沿って考察する。

(1) 新たな発想を作り出すための環境

まず「新たな発想を作り出す」ことについてである。土木地質分野で新たな発想とは、たとえば、新しい原理による地質調査方法、といったものであろう。一般に新たな発想は個人に負うところが大きく、共同研究ではなかなか取り扱うことができないと考えられている。しかし筆者は、異なる知識や考え方を持つ研究者どうしの議論や共同作業の中において、新たな発想が生まれやすいと考えている。

卑近な例であるが、共同研究者（元同僚）と筆者はかつて「エアートレーサー試験」という試験を開発したことがある。この試験は岩盤内に、ガスや煙などの空気を媒体とするトレーサーを送り込み、その流出状態から岩盤の開口亀裂の連続性や、岩盤の緩み分布などを把握する方法である。この方法の最初の「発想の種」の発案者は彼である。

彼は土木地質分野に関しては経験が浅かったが、その分逆に、柔らかな発想でその種を生み出した。一方、筆者は当時、土木研究所とは別の職場にいたが、筆者も以前から熱画像などで切土のり面裏の岩盤性状の調査法を研究しており、強制的に岩盤を温度変化させてリアクションを見ることの可能性について検討していた。当時、彼も岩盤内に熱気を送り込もうと考えていたため、その発想の種に可能性を感じ筆者は夜も眠れないほどであった。その後すぐに、彼と筆者は一緒に研究することとなり現地調査を繰り返した。その結果、一般的な機器による熱気ではなかなか岩盤を暖められないこと、煙を使うと比較的容易に結果が出ることなどから、現在のエアートレーサー試験の手法に落ち着いた。さらにその際、筆者は、彼との現場経験をもとに、ボーリング孔内に自然に発生する空気の流れや、ボーリング孔内に強制的に送風したときの空気の流れを測定する方法である「坑孔内風速測定法」を開発したほか、熱赤外映像の利用経験から、可視～近赤外域の100波長以上のスペクトルデータ画像を得て岩質判定を行う地上型リモートセンシングカメラ「スペクトルカメラ」などを開発した。

この例は、一つの発想の種を共同でふくらますことで新しい技術が生まれること、また一つの種が周囲の研究者に別な発想の種をも誘発させることがあることを示している。共同研究においては、このような良い作用関係を作り出すことが重要である。特に重要なのは、問題に対してお互いにトライアンドエラーで挑むことができる自由で集中できる時間、精神的に自由な研究環境、異なる視点・専門性を持つ人間との接触ないし協同作業の行われる環境、などである。このような環境は研究環境としても楽しいものであるだけでなく、研究者個人のレベルアップにもつながりやすい。これは組織間での共同研究にも当てはまると思うが、組織間の共同研究では、なかなかこのような環境を作り出すことができないものである。このような環境を強制的に作り出すために、筆者は、組織間の共同研究でもできる限り異分野のメンバーと組み、しかもフィールド（現場）で一つのものを見て共同調査や議論をするようにしている。フィールドでは時間は限られているが他の雑用と隔離され集中して調査や研究ができるし、野外であるという開放感が共同研究者の自由な発想を誘発すると考えるからである。

(2) 難解・複雑な問題を解決するための環境

次に、「難解・複雑な問題を解決する」ことについてである。ここでは、筆者が実施している、道路斜面防災に関する共同研究を例に挙げて説明する。この共同研究の目的は、「『道路斜面のハザードマップ』を作る手法を開発し普及すること」である。斜面のハザードマップについては、必要性は認識されていたが、発生源や発生メカニズムが多様であるため、これまできちんとしたものは作成されていなかった。そもそも、過去の斜面災害履歴さえもこれまで系統的に収集整理されていなかった。しかし防災の基本はどこでどのような災害が発生しそうか予測することであり、災害履歴の収集や解析とハザードマップの作成は不可欠である。課題は2つに分けられた。1つは技術的な課題であり、

基礎データ（災害履歴、地形図の精度など）のレベル向上、ハザードマップを作る際の「発生源」・「危険度」・「発生時の影響範囲」などの設定方法の開発、といった問題である。このため、共同研究者の選定時点から、地質調査だけでなくGIS、地形測量などの専門会社も加え、さらにシミュレーションによる解析やマッピングを行うために、コンピュータに詳しい交流研究員からの支援もお願いした。解析ソフトの完成のためには大学への委託研究やソフト会社への外注も行った。この結果、「道路斜面ハザードマップ作成要領（案）」やその関連のマニュアル類、およびいくつかの支援ソフトが完成した（現在も継続中）。

成果の達成のためには、非常に多くの分野の方との作業が必要となったほか、共同研究者にもかなりの作業負担をお願いすることとなった。しかしそれをなし得たのは、防災という分野で生きる共同研究者の中での共通理解として、「多少課題があっても、今まで誰もなしていない、斜面のハザードマップを作る必要があるのだ」という確固たる目標が存在したためと考えている。

現在、このプロジェクトは「実用化」や「普及」という次の段階に入っている。道路斜面のハザードマップによる防災施策を行政的に進めることである。そのために、引き続き共同研究者とともに、ハザードマップ作成要領（案）を行政的に使いやすい形にリバイズする作業を行っている。この段階では第2の課題である、行政的な課題をクリアする必要がある。たとえばハザードマップを作るうえで高精度の地形図がどうしても必要なかを行政側に説明するだけでも大変な努力が必要である。また、ハザードマップそのものの必要性についても、行政的視点から見ると検討不足の面もある。たとえば過去の道路斜面災害の整理、道路斜面防災に対する現状の整理、諸外国の状況と日本の状況、これまでの防災システムでは何故いけないのか、何故作成すべきか、何故今作成する必要があるか、どこで優先的に作成すべきか、作成コストと利益の整理、作成のための道路管理者の作業量、情報に対する責任の問題と対応、情報の精度の問題と対応、既存の防災システムとの関連性、マップ作成に最低限必要な情報、マップに表記すべき情報のスタイルの統一、各現場での作成にあたっての問題点、などである。そのため上記諸問題の検討やモデル現場でのハザードマップの試作なども行っているところである。その意味では行政側も一種の共同研究者になっている。

以上のように、難解・複雑な問題を解決するためには、多様な研究者、技術者だけでなく、社会的な課題であればあるほど、行政や住民等も含めた複雑な共同作業という形態が必要になる。このとき必要なのは、データセンター、データに基づく現状分析と研究の必要性の提示、具体的な研究目標（将来ビジョン）の提示、研究ステップや個別開発技術の具体的かつ詳細な設定、フレキシブルな研究ネットワーク、ネットワークの密な意志疎通などである。これらは特に目新しい項目ではないが、とりわけ、研究が複雑になるほど重要なのは、関係者が共通にもてる明確な目標（将来ビジョン）である。研究の価値の半分は目標（将来ビジョン）の設定で決まり、もう半分はその目標のどこまで

達成したかで決まると思う。

5. おわりに

あまりまとまりのない内容になり恐縮であるが、結論として、土木地質分野における共同研究は、他分野に比べ、やや低調であると思う。これは、土木地質学がこれまで開発土木を支える役目を担ってきており、これに特化した専

門化・細分化の方向から、まだ方向転換し切れていないためと考えられる。しかし筆者は、土木地質学は開発土木技術にとどまらず、一種の土地利用学、地球暮らし技術だと思っている。今後の土木地質学は、異分野と協同して、総合力によって、人類が直面しているそれぞれの暮らし・土地利用の諸問題に立ち向かうようにすべきである。そのとき必ず共同（協同）研究という体制が必要である。

「地質と調査」投稿募集

当誌は、常日頃地質調査に携っておられる方々と、その周辺の方々とにご愛読いただけるように企画された雑誌です。特に、技術能力の向上を計ることの一助となり、それについて業界の発展に少しでも役立つことができたと願っております。そういった意味からも、多数の方からの投稿をお待ちいたしております。

学術論文的なものはもちろんですが、できる限り、毎日の現場で経験された事例に立脚した報告等をいただきまして、技術面の問題・情報の交換など、十二分にこの誌面をご活用いただきたいと存じます。

要 項

- 掲載ページ 4ページ以内

400字詰原稿用紙20枚以内（図表・写真を含む）。

（お申し出があれば原稿用紙を送付します）

ページ数を超えた場合には、ご諒解を得た上で、削除あるいは分割掲載することもありますので、お含みおき下さい。

- 原則として、寄せられました原稿は返却いたしません。

- 寄せられました原稿の採否、掲載号、用語等につきましては当編集委員会にご一任下さい。

- 掲載いたしました原稿については規定の原稿料をお支払い致します。

なお、掲載いたしました内容に対するご意見、これからの掲載希望の分野（項目）、質問などおよびその他のお問合わせは下記をお願いいたします。

社団法人 全国地質調査業協会連合会事務局

電話 03(3818)7411

株式会社 土木春秋社

電話 03(3370)5020

自然に学ぶ環境浄化技術とその事業化

さとう つとむ いとうけんいち ふくしけいすけ
 佐藤 努 *・伊藤健一**・福士圭介***
 いけだ ほだか ひらの たけつぐ はしもとこういち
 池田穂高****・平野武嗣*****・橋本晃一*****

1. はじめに

近年の環境規制強化の中で、さまざまな環境浄化材料が流布しており、それらは「効果」と「コスト」を選択基準として必要に応じて活用されている。中でも、樹脂材やキレート材は、有害物質に対する高い吸着能を有することから、有効な環境浄化材料として急速に市場へ広まった。しかし、その選択基準に「長期安定性」や「環境負荷」という項目が加わると、人工的な有機化合物を土壌や水質の改善を目的として環境中へ直接投入することには疑問が残ってしまう。そこで、元より天然に存在し、天然においてその長期的影響評価が可能な物質である天然鉱物が、環境負荷を限りなく抑えられる材料として環境浄化の主役となると考えている。そこで我々は、人為的な処置なしで自然に起こりうる作用によって汚染の浄化が達成されているナチュラル・アテニューエーション（自然浄化）から、選択的にヒ素を吸着して安定に存在する鉱物のシュベルトマナイトを見出し、その吸着機構や吸着量、生成条件や安定性などを明らかにして、ヒ素をはじめとする有害オキシアニオンの浄化材料として世界に先駆けて市場へ送り出している。

2. シュベルトマナイトの性質とその開発経緯

シュベルトマナイトは、1994年に国際鉱物学協会に認定された、比較的最近認知された低結晶性の鉄酸化水酸化硫酸塩鉱物である。構造化学組成式は、 $Fe_8O_8(OH)_{8-2x}(SO_4)_x$ ($1 < x < 1.75$) と記述される¹⁾。鉄八面体8個が輪状となり、そのトンネル構造の中心と粒子の外周に硫酸が配位している¹⁾(図1)。また、低結晶性のために微粒子として存在し約 250 m²/g もの巨大な比表面積を有しているこ

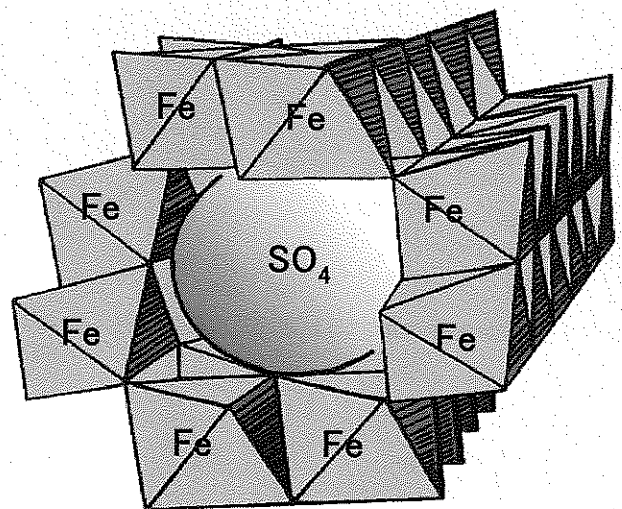


図1 シュベルトマナイトの構造模式図（鉄八面体8個が輪状となり、そのトンネル構造の中心と粒子の外周に硫酸が配位している。原図は福士・佐藤（2003）より抜粋）

と、ゲータイトの準安定相であり、生成後は湿潤条件下であれば数日で相変化する²⁾。酸性鉱山廃水などの鉄を含む硫酸酸性環境下で、鉄酸化細菌の活動により溶存2価鉄が酸化されて生成することが知られている^{2)~3)}。

安定なヒ素吸着材料としてのシュベルトマナイトは、我々がヒ素汚染水のフィールド調査で偶然発見したことに由来する。群馬県西之牧休廃止鉱山地域を調査した際、鶏冠石などのヒ素含有鉱物を含む廃石が地表水と反応してヒ素を漏出しており、周辺に流れる河川水のヒ素濃度は環境基準を超えていた。しかし、わずか200m下流では河川の希釈に因らずヒ素濃度が環境基準を下回っていた⁴⁾(図2, 3)。そこで、ヒ素が流域周辺に残留していると推測して精査したところ、河床にある縞状の黄褐色堆積物中にヒ素の存在を確認した。逐次抽出分析の結果、堆積物はゲータイトとシュベルトマナイトであること、堆積物中のシュベルトマナイトに最大約6wt%の含有量でヒ素が濃集していることが見出された⁴⁾(図4)。このシュベルトマナイトは、廃石より浸出した2価鉄が鉄酸化細菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) により急速に酸化されて生成し、それにヒ素が濃集されているため、河川中のヒ素濃度が減ぜられているものと考えられる。合成シュベルトマナイトのヒ素の吸

* 金沢大学自然計測応用研究センター助教授

** (株)ソフィア, 金沢大学大学院自然科学研究科

*** Johns Hopkins University

**** (株)ソフィア

***** 金沢大学共同研究センター, (有)金沢大学ティ・エル・オー

***** 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源開発技術グループ鉱害防止技術チーム

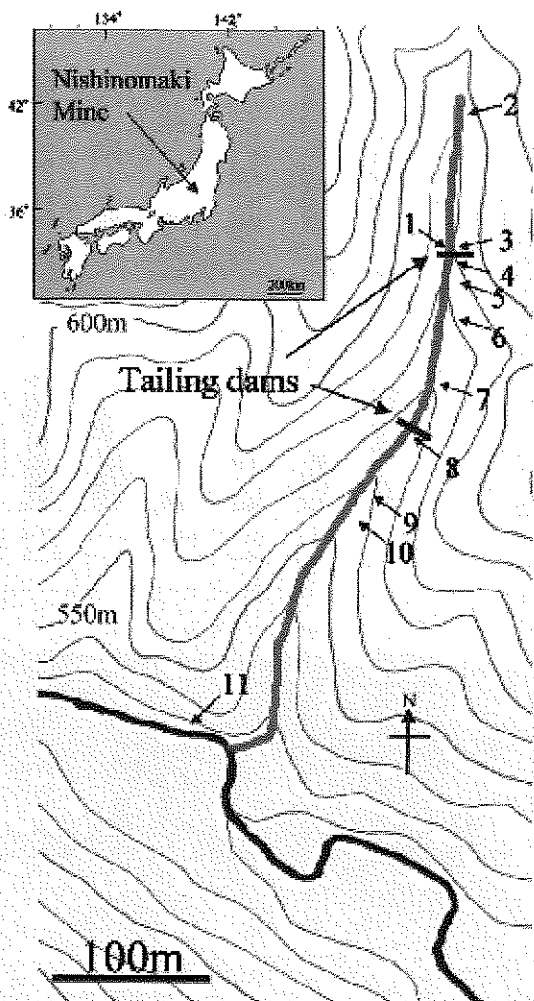


図2 西之牧休廃止鉱山地域の位置と試料採取地点(数字で示した1-11の地点で水や沈殿物の分析を行った。原図は Fukushi et al. (2003) より抜粋)

着実験から、ヒ素は最大約8 wt%まで吸着することが確認された^{9),10)}。しかし、同じ場所に堆積するゲータイトにはほとんどヒ素が認められないこと、準安定相のシュベルトマナイトが相変化せずに大量に堆積していることが疑問として残った。そこで、異なる濃度のヒ素を吸着させたシュベルトマナイトを50°Cの飽和蒸気圧下で熟成させる加速変質実験を行い、ヒ素を含まないシュベルトマナイトが一カ月で容易にゲータイトに相変化するのに対して、ヒ素を含むものはその構造を安定に保つことを実証した(図5)。ま

た、この安定化のメカニズムは、ヒ素吸着による化学組成の変化に伴う生成自由エネルギーの変化によるものであることを明らかとした¹¹⁾。さらに、シュベルトマナイトへのヒ素吸着は、トンネル構造の外側に配位する硫酸との配位子交換によることも明らかとした¹²⁾。

これら一連の調査研究から、シュベルトマナイトの吸着(浄化)能力と長期安定性が明らかとなり、シュベルトマナイトの環境浄化材料としての有効性が示唆された。

3. 環境浄化技術への適用

ナチュラル・アテニューエーションに学ぶシュベルトマナイトを利用した環境浄化技術は、大きく二つの活用法に分けられる。一つは前述したヒ素吸着材料としての活用、もう一つは、シュベルトマナイトの生成も含めたプロセス処理への活用である。プロセス処理とは、汚染水に含まれるヒ素を、自然浄化を模倣した処理工程により安全に除去する技術である。

前述のように、シュベルトマナイトはヒ素の優秀な吸着体であり、ヒ素を吸着後は長期的に安定なヒ素のシンクとなる。しかし、シュベルトマナイトそのものは非常に不安定なため、実用面から、ヒ素を吸着するまでにシュベルトマナイト自体が相変化してしまい、その能力が損なわれるという問題が生じる。シュベルトマナイトをヒ素吸着材料とするには、ヒ素を吸着していなくとも、シュベルトマナイトとしての構造が安定に維持されることが課題であった。そこでまず、シュベルトマナイトの吸着特性について検討を行い、① ヒ素への吸着能を維持するためにヒ素より低い親和性を示し、② ヒ素が吸着した時と同様に相変化を抑制してシュベルトマナイトを安定に維持し、③ ヒ素との交換反応で環境中に放出されても汚染物質とならないケイ酸をシュベルトマナイトに吸着させることにより、物性の安定した環境浄化材料としての製品化に成功した(図6)。

シュベルトマナイトのヒ素などオキシアニオンへの高い選択性、汚染物質吸着後の長期的な安定性、天然鉱物であることによるきわめて低い環境負荷という特徴は、環境材料となることでさらに具体性をもってその有益性を示す。

シュベルトマナイトの高いオキシアニオン選択性を活用

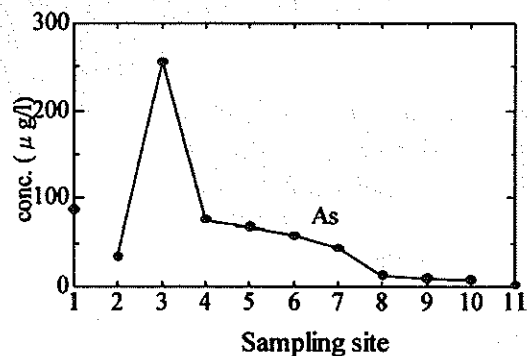
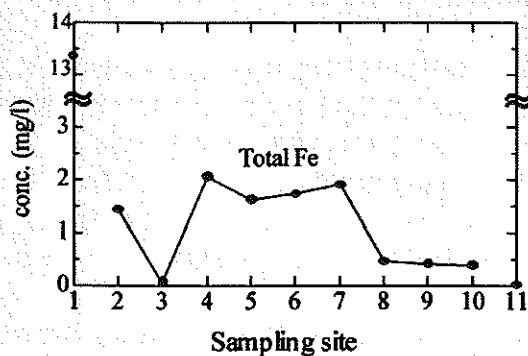


図3 西之牧休廃止鉱山の廃石捨て場流域に流れる河川水中のヒ素と鉄濃度の変化(横軸の数字は図2に示した採取地点と同じ。1は坑口, 3は廃石場, 4~10はシュベルトマナイトの堆積が確認された場所で、特に9および10地点で厚く堆積していた。原図は Fukushi et al. (2003) より抜粋)

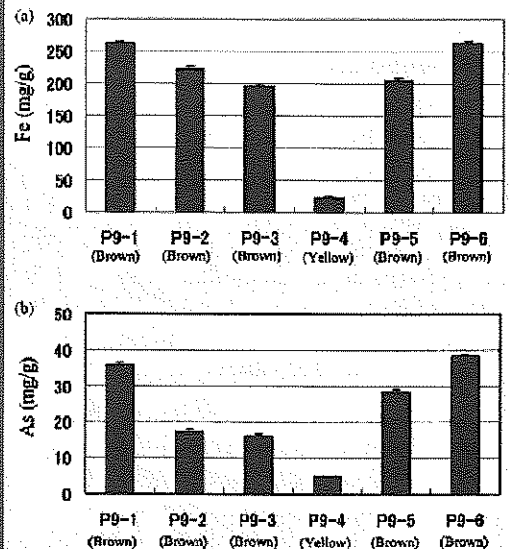
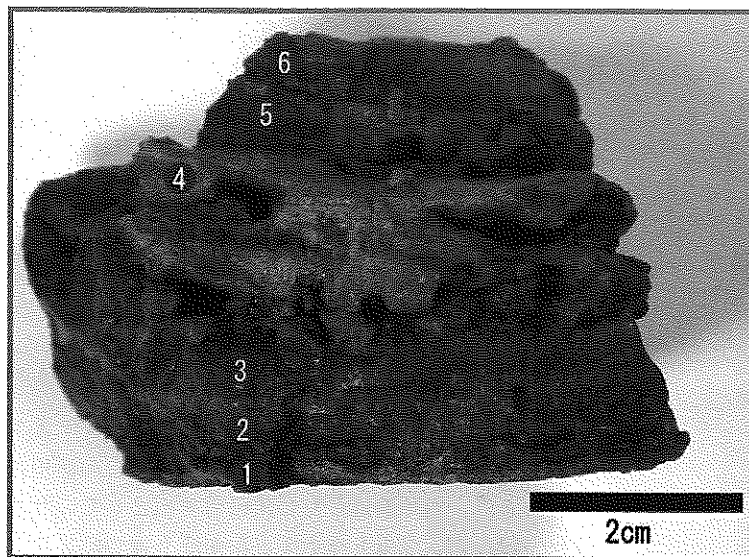


図4 採取した河床堆積物と異なる部位に含まれるヒ素とシュベルトマナイト由来の鉄含有量 (採取地点は図2の9。シュベルトマナイト由来の鉄含有量はシュウ酸アンモニウム抽出により、ヒ素は塩酸抽出による。原図は Fukushi et al.(2003) より抜粋)

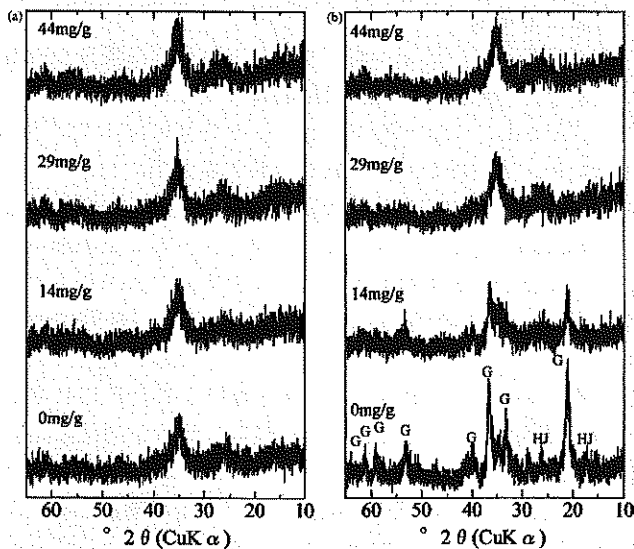


図5 加速変質処理前後におけるシュベルトマナイトのX線回折線プロファイル変化 (左図は処理前、右図は1か月処理後。各プロファイルの左上の数値はヒ素吸着量を示す。原図は Fukushi et al.(2003) より抜粋)

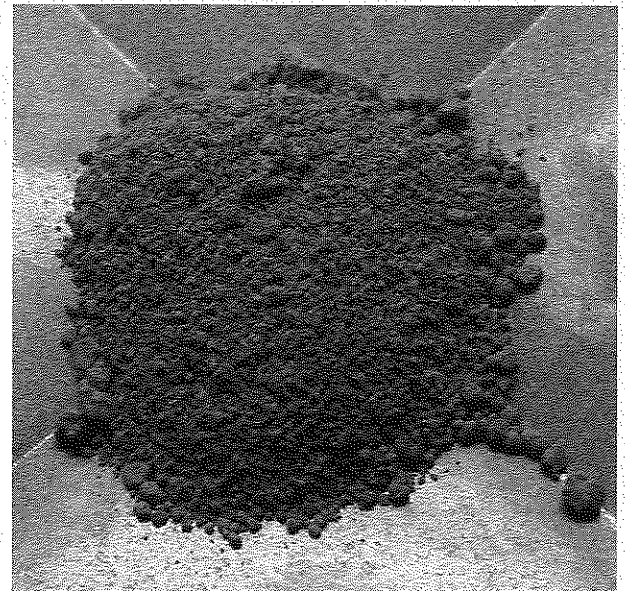


図6 シュベルトマナイトを用いたヒ素吸着材料 (シュベルトマナイトは安定化処理が施されている。製品名: Asre-S (アズレーエス))

した用途の一つに、高塩濃度溶液中に存在するヒ素の除去がある。ヒ素は天然では極低濃度で広く存在するため、食品等の濃縮を伴う製造過程では、一部の原料にわずかに含むだけでヒ素が濃縮され、相対的に製品中のヒ素含有量が上昇することがある。この場合、薬剤添加は製品中に残留してその品質に影響するため適さず、イオン交換樹脂のような既存の吸着材では高塩濃度による陰イオン間の吸着に対する競合からヒ素を除去することができない。そこで、あるヒ素を含む高塩分濃度の食品原料溶液からのシュベルトマナイト材料によるヒ素の除去を検討したところ、シュベルトマナイトの持つ特定のオキシアニオンのみを選択的に吸着する能力が発揮され、塩分に大きく阻害されることなくヒ素が除去されることを確認した。また、我々は井戸水のヒ素汚染が深刻なバングラデシュにおいてシュベルトマナイトによる井戸水中のヒ素の除去を検討しその有効性を実証した¹³⁾。その際、薬注などの処理設備がなくとも水中

に曝すだけで自発的にヒ素の吸着を行い、かつ使用後に安定であるため不溶化処理や管理型処分場を必要としないというシュベルトマナイトの利用上の特徴が、他の浄化材料にはない大きな優位性であることを確認するに至った。この優位性は、汚染物質に関する処理技術とインフラが未発達の実地発達途上国だけでなく、排水や廃棄物などの汚染物質処理全般に共通のものであり、環境汚染の処理や対策の簡素化、コストダウンを実現するものである。

これらの実地で得られた成果は、これまで既存資材ではその能力やコスト、処理方法の面で処理対策の導入が困難であった、温泉水、地すべり地域における排水、食品原料中などに存在するヒ素さえも除去を可能とする、シュベルトマナイトの実効性の高さと同様な用途の可能性を示している。

また、シュベルトマナイト製品化のための安定化技術は、金沢大学の技術移転機関である有限会社金沢大学ティ・エ

ル・オーより、同大学発のベンチャー第一号である株式会社ソフィアを共同発明者として特許を出願している。

国内にある鉱山のほとんどは休業あるいは廃業している。しかし、排水基準を超える有害元素などを含む坑廃水が河川等へと放出されている場合は、人々の水環境を保全するために恒久的とも言える坑廃水処理が行われている。そうした鉱山は国内に100箇所以上もある。その中には元の採掘会社が不在である場合もあり、その場合坑廃水処理は自治体が国の補助を得て行っており多額の税金が投入されているのが実情である。

これまでの酸性坑廃水処理は、基本的に一般の工場の廃水処理と同様に、カルシウム薬剤を投入して鉄やヒ素を共沈させつつ中和する方法がとられてきた。しかし、この処理プロセスでは、埋め立て処分されるヒ素含有中和殿物が大量に発生することから、殿物発生量を低減する新しい処理方法が求められてきた¹⁴⁾。そこで、前述の西之牧休廃止鉱山で認められた自然浄化機構の知見を用いて、鉄の豊富な坑廃水よりヒ素吸着能力が高いシュベルトマナイトを合成

してヒ素を濃集させ、ヒ素を効率的に回収することに思い至った。実際に、自然浄化機構の作用条件に合わせて坑廃水の酸化とpH調整(西之牧の排水と同じpH3.5)を行ったところ、鉄主体のシュベルトマナイト殿物が合成され、ヒ素のほとんどがシュベルトマナイトに分配されていることを確認した。このように、シュベルトマナイトの自然浄化プロセスを用いることで、中和薬剤の節約、坑廃水中のヒ素の効率的な除去・回収、生成殿物の発生抑制が可能であることが示された^{14),15)}(図7)。さらに、産業廃棄物として問題となっている廃コンクリート微粉によりヒ素除去後の廃水を中和して、ヒ素濃度の低い安全な石膏質の殿物を得た。これらの検討結果から、坑廃水を資源として捕らえた新しい資源回収型坑廃水処理システムモデルを構築した^{14),15)}(図8)。このシステムは、①ヒ素、②鉄、③カルシウムと硫酸の3段階の処理・回収プロセスから成り立っている。①では酸化とpH調整によりヒ素を除去するためのシュベルトマナイトを合成する。ヒ素は回収、資源化される。②ではヒ素が除去された坑廃水を再度調整してヒ素を含まないシュベルトマナイトを合成、ヒ素浄化材料として資源化し、一部をヒ素除去の助剤として①に還流する。③では廃コンクリートなどカルシウム系中和剤により石膏系殿物を合成して、土木資材などへ利用する。このシステムは、自然環境の調査研究から生み出されたものであり、地球化学的・鉱物学的研究が環境関連分野に広く資することの成功例といえる。

また、この坑廃水処理技術についても、株式会社ソフィアとの共同提案により独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(旧金属鉱業事業団)と共同研究を行っており、3者の共同開発技術として有限会社金沢大学ティ・エル・オーより特許出願中である。

4. 今後の展望

上述の経緯から開発されたシュベルトマナイトは、実際のヒ素汚染土壌の浄化における検討の結果、わずか1wt%以下の施用で十分なヒ素の不溶化効果が得られ、土壌汚染

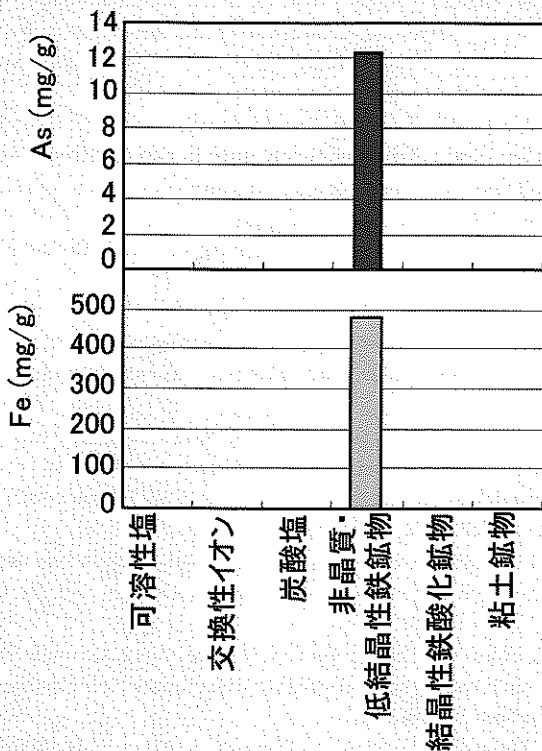


図7 坑廃水より合成したシュベルトマナイト含有殿物の逐次抽出分析結果(生成した鉄質殿物は非晶質・低結晶性のシュベルトマナイトでその画分にヒ素の濃集が認められる)

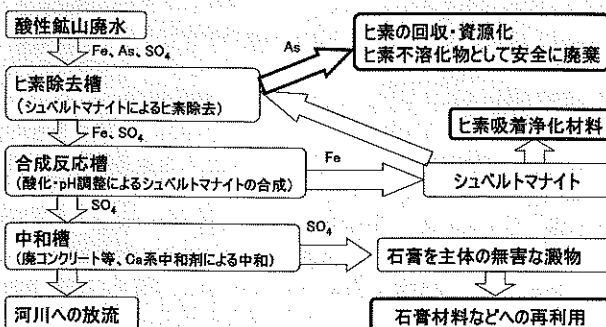


図8 西之牧休廃止鉱山における自然浄化機構に学び提案された資源回収型鉱山廃水処理システム

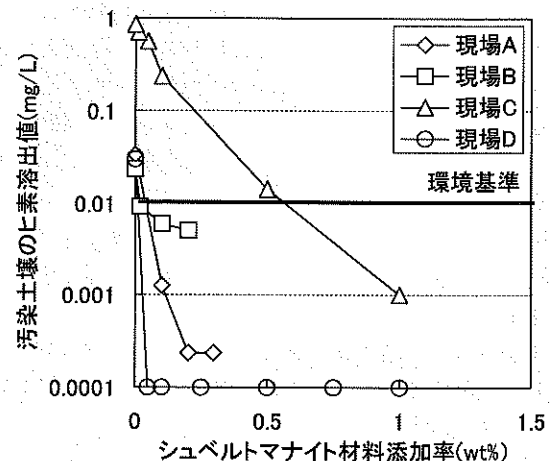


図9 さまざまなヒ素汚染土壌へシュベルトマナイトを添加した後のヒ素溶出量(異なる含有量となるようにシュベルトマナイト材料(アズレ・エス)をヒ素汚染土壌に添加し分析。分析は環境庁告示第46号に準拠)

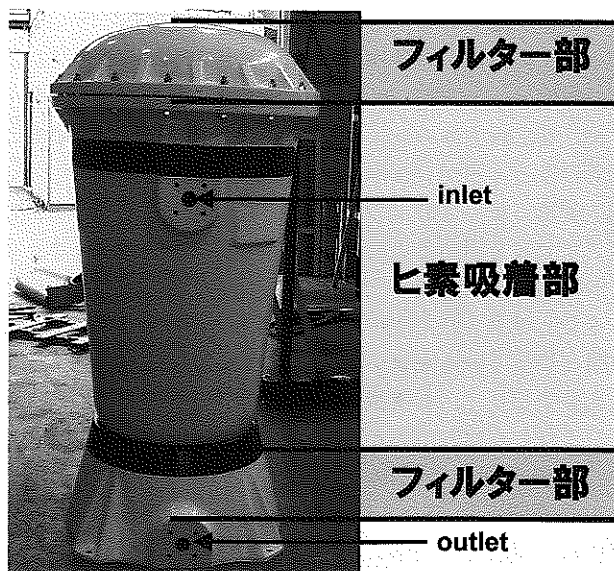


図10 シュベルトマナイトを用いた水処理装置 (吸着部はシュベルトマナイト材料を担持させた鉱物質繊維, フィルター部は圧密をかけた同繊維からなる)

対策に非常に有効な材料であることが実証された(図9)。添加量が微量であることはコストや処理後の土壌の増量を抑えるうえで大きな利点である。しかし、施工の面で均一な攪拌の困難という新たな課題を生じさせた。そこで、土木機械メーカーの協力を得てシュベルトマナイト材料を土壌へ均一に混合する方法の検討を行い、最適な混合方法と攪拌機の基本設計を確立した。現在は同社において施工効率の高い自走式の土壌攪拌機を設計、試作しており、今夏にはリリースの予定である。

ヒ素を含む水の処理について、対象水中で反応・除去を行うプロセス処理は先に説明したが、これは鉱山廃水などの大規模設備向けの方法であり、汎用である小規模の処理では、吸着材料の使用法として簡潔なカラムによる通水処理が最適とされる。そのため、微粉体のシュベルトマナイトについてカラム化への一般的な方法である粒状化を検討した。しかし、造粒は低結晶性の特徴である卓越した比表面積を減少させて、吸着の能力を引き下げてしまう。そこで、シュベルトマナイトを表面積の大きい材料に担持させてカラムに充填する方法を検討し、鉱物質繊維とシュベルトマナイト材料を混合することでこれを解決した(図10)。現在は、浄水器メーカーと家庭用浄水器にも利用可能なSV100以上の高速処理カラムの開発を進めており、こちらも今夏頃のリリースを予定している。

環境汚染は、人間が排出する原因物質の量よりずっと少ない程度で発生している。これは、自然界に存在する鉱物学的作用を含めた多種多様な緩衝、浄化などの作用がその負荷を軽減しているためである。そうした自然の叡智、理を解明し理解することは、自然の摂理に適った環境対策技術を私たちに教えてくれる。これまでの資源利用は、採掘から有価物の抽出までの過程に主眼を置いてそのプロセスを効率化し発展させてきたが、今後は自然に学び、最後ま

で責任をもった資源利用を進めていくことが、我々の後世への使命となる。鉱物学的、地球化学的視点による調査研究はそのための重要な一つの手法である。

そして、今回示したような自然科学的知見からのアプリケーションの開発は、学術研究機関と産業分野が連携して水平分業を行うことで初めて、社会的に影響力を持った事業として進めていくことができるといえよう。

参考文献

- 1) J. M. Bigham, U. Schwertmann, L. Carlson, E. Murad: A poorly crystallized oxyhydroxysulfate of iron formed by bacterial oxidation of Fe (II) in acid mine waters, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 54, 2743-2758, 1990.
- 2) R. M. Cornell, U. Schwertmann: *The Iron Oxide*, VCH Publishers, Weinheim, pp. 553, 1998.
- 3) 田崎和江・朝田隆二・池田頼正: 水面に短時間で発生する鉄生体鉱物の薄膜, *粘土科学*, 42, 21-36, 2002.
- 4) 福士圭介・佐藤 努: フェリハイドライト・シュベルトマナイトの生成と環境親和物質としての役割, *粘土科学*, 42, 148-153, 2003.
- 5) J. M. Bigham, D. K. Nordstrom: Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters, *Sulfate Minerals, Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, vol. 40, 177-260, Mineralogical Society of America, Geochemical Society, 2000.
- 6) J. Yu, B. Heo, I. Choi, J. Cho, H. Chang: Apparent solubilities of schwertmannite and ferrihydrite in natural stream waters polluted by mine drainage, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 63, 3407-3416, 1999.
- 7) P. C. Singer, W. Stumm: Acid mine drainage, the rate-determining step, *Science*, 167, 1121-1123, 1970.
- 8) N. Lazaroff, W. Sigal, A. Wesserman: Iron oxidation and precipitation of ferric hydroxysulfates by resting thiobacillus ferrooxidans cells, *Appl. Environ. Microbiol.*, 54, 924-938, 1982.
- 9) K. Fukushi, M. Sasaki, T. Sato, N. Yanase, H. Amano, H. Ikeda: A natural attenuation of arsenic in drainage from an abandoned arsenic mine dump, *Applied Geochemistry*, 18, 1267-1278, 2003.
- 10) K. Fukushi, T. Sato, N. Yanase: Solid-solution reactions in As (V) sorption by schwertmannite, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 3581-3586, 2003.
- 11) K. Fukushi, T. Sato: Using a surface complexation model to predict the nature and stability of nanoparticles, *Environ. Sci. Technol.*, (in press).
- 12) K. Fukushi, T. Sato, N. Yanase, J. Minato, H. Yamada: Arsenate sorption on schwertmannite, *American Mineralogist*, 89, 1728 (2004).
- 13) 佐藤 努・福士圭介・伊藤健一・池田穂高・濱部和宏, 横田 漢: シュベルトマナイトを用いたバングラデシュヒ素汚染井戸水の浄化, 日本鉱物学会年会, 日本岩石鉱物鉱床学会学術講演会講演要旨集, 47, 2002.
- 14) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構: シュベルトマナイトによる鉱山廃水資源化システムに関する研究, 坑廃水対策技術 高効率異物造粒システム技術, 平成15年度鉱害防止技術調査研究報告書, 94-120, 2004.
- 15) 佐藤 努・橋本晃一・伊藤健一・福士圭介・湊 美緒・大田由貴恵・伊藤亜希子: 自然浄化機構に学ぶ資源回収型酸性鉱山廃水処理方法, 資源・素材学会平成16年度秋季大会要旨集, 73-76, 2004.

土砂災害警戒避難支援システムの技術移転

ふるかわ こうへい
古川 浩平*

1. はじめに

2004年4月に国立大学が国立大学法人化され、大学で開発された知的財産を民間に技術移転することにより研究資金を確保しようとする動きが加速された。本誌の読者でTLOという言葉を知られた方がどれ位あるだろうか。どちらかというと、TLOは地質や土木分野の人にとっては、なじみの薄い存在であったのではないかと思われる。しかし、今や大学や社会が大きく変革し、グローバルな競争にさらされている企業が自前で全ての研究開発を行える時代ではなくなってきており、そのため大学で開発された技術を企業へ移転するための機関TLOの重要性が増している。

TLOとはTechnology Licensing Organization(技術移転機関)の略称で、大学で創出された研究成果をはじめとした知的資産を特許等の形で権利化し、それを民間企業へ技術移転することにより得られた収益の一部を大学の研究資金として還元し、その資金で大学はさらに新しい研究成果を生み出す、という知的創造サイクルのキーとなる機関です。

ただ、上でも述べたように、特に地質分野は過去特許とほとんど関係がなかったため、TLOの存在は本誌の読者には縁遠かったかもしれません。しかし、日本の背後に中国がひたひたと迫ってきている今日、知的資産をいかに保護・活用して日本の国際競争力を維持するかが問われています。

地質そのものは特許とは関係がないのかもしれませんが、その周辺分野、たとえば今私が行っている土砂災害の警戒避難支援システムなどは地質の分野と近く、それでいて特許で技術を保護できる一例です。地質調査そのものを特許化することは難しいでしょうが、地質調査を含んだ事業は、かなりの部分が特許といった形で知的資産を保護できると考えられます。

本誌の読者には「特許なんて関係ない」とお考えの方が多いと思いますが、ここでの事例をご覧になって、皆様が行っておられる日常業務の中にも特許という形で権利化で

きるものもあると思います。これを読まれて特許に目覚めていただければ何より幸いです。

2. 従来の土砂災害警戒避難基準線

梅雨や台風時期などの集中豪雨によって発生する土砂災害に対しては、従来からハード、ソフト両面からの整備がされてきた。しかしながら、ハード対策による整備率はわずか20%余りと低く、土砂災害の発生を抑制する防止施設の整備が十分であるとは言いがたい。これに対し、近年ソフト対策に力点が置かれ、各種の広報活動により危険箇所や避難場所・避難経路などの周知徹底が行われているものの、現状ではそれらが有効に機能しているとは言いがたい。

このような現状に鑑み、国土交通省ではハード対策とともに、ソフト対策をより強力に推進していくために、ソフト対策に関する新たな法制度である「土砂災害防止法(土砂災害警戒区域における土砂災害防止対策の推進に関する法律)」¹⁾を制定し、平成13年度から施行している。

このように、ソフト対策の重要性が高まる中で、それらを充実させ、危険箇所周辺に居住する住民の生命や身体を保護するためには、日頃から災害時の避難に関する情報を周知徹底しておくことが重要であるが、それらを有効なものとするためには避難時期の目安となる警戒避難基準雨量を明確にしておくことが必要であると考えられる。

避難時期の目安となる警戒避難基準雨量には、従来から発生限界雨量線(Critical Line:以下、CL)が実務レベルでも広く用いられており、これまでにいくつかの設定手法が提案されている²⁾³⁾。しかしながら、従来手法では、以下に示すようにいくつかの問題点が存在する。

まず第一は、CLを降雨要因のみで設定しているため、箇所ごとに異なる崩壊危険度を考慮できず、崩壊危険度の異なる箇所であっても、降雨に対してはすべて同一の危険性を有することが挙げられる。

第二に、従来のCLのほとんどは簡易な線形で設定されているが、さまざまな要因が複雑に絡み合って発生するがけ崩れに対しては、必ずしも高い予測精度となっていない。しかも、その設定に際しては、発生データに基づいて危険領域を特定することが前提になっているため、発生時刻な

* 山口大学工学部教授
(有)山口ティール・エル・オー取締役

ど不確定要素が多く含まれる発生データに依存した CL となる可能性が高い。

第三に、特になげ崩れでは小さい降雨で崩壊が発生することがある。これらのデータを用いて CL を引くとすると、雨が降り始めるとすぐ避難しなければならなくなり、実際上運用できない。そのため、集中的に発生するなげ崩れと散発的に発生するなげ崩れを分け、集中的に発生するなげ崩れのみを対象としているが、この分け方に技術者の主観が介在する余地があり、問題が残されている。

3. RBF ネットワークを用いた非線形 CL の設定

そこで、上記の問題点を同時に解消することを目的に、RBF ネットワーク (Radial Basis Function Network: 以下、RBFN)⁹⁾を用いた個別危険箇所ごとの非線形 CL の設定手法を開発し、それを特許化することで開発した技術の保護・活用を試みた。この手法は土石流・なげ崩れいずれの CL に対しても適用できるが、ここでは主としてなげ崩れを対象として個別斜面ごとの非線形なげ崩れ CL (以下、個別非線形 CL) の設定方法を紹介する。

3.1 RBFN の概要

RBFN は、脳や神経回路網をモデルとした階層構造で、通常のニューラルネットワーク手法と同じく入力層 (素子数 n 個)、中間層 (素子数 m 個)、出力層 (素子数 1 個) の 3 層からなっている。各層は入出力を行う素子から構成されており、各層間の素子は結線によって結ばれているが、

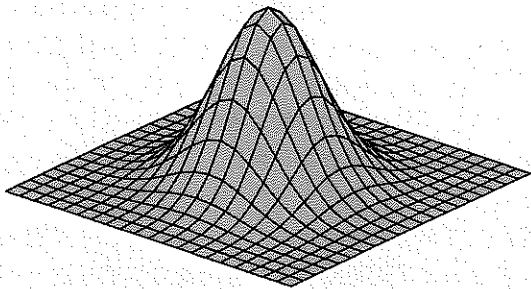


図1 ガウス関数の形状

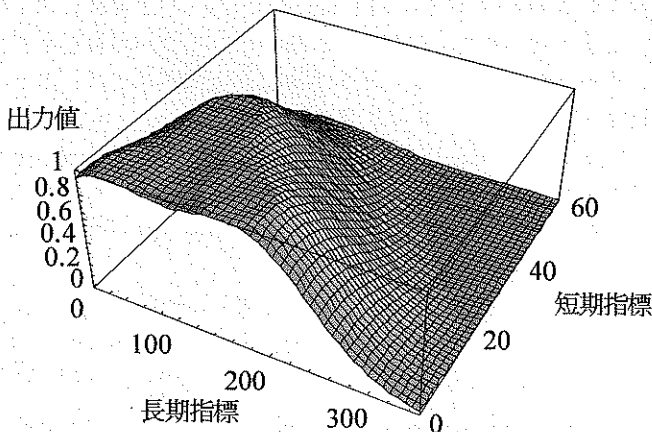


図2 判別境界面の代表例

同じ層内の素子同士は結合されていない。

中間層における j 番目の素子の出力は主として基底関数の一つである釣鐘状のガウス関数 (図 1) を用いる。

RBFN はこれらのガウス関数を長期と短期降雨の 2 軸で示される 2 次元平面上に 1 時間ごとの降雨の点に配置し、それらを重ね合わせることで判別境界面を設定する。これらの詳細をここで述べることはできないが、興味のある方は参考文献を参照願いたい^{4)~6)}。

3.2 非線形 CL への応用 (特許化以前)

2. で述べた第二、第三の問題点を解消するために、RBFN を土砂災害の非線形 CL に応用した⁹⁾。RBFN によって得られた判別境界面の一例を図 2 に示す。この判別境界面を出力値のある値で切った等高線が CL となる。この一例を後の図 6 や図 9 に示す。これらの等高線のいずれかを CL として用いればよい。この CL を用いることにより、2. で述べた第二の問題点である線形によるほとんどの問題は解消される。

第三の問題点に関しては、たとえば図 2 の短期指標が 0 で長期指標が 100 近傍をみると少しくぼんでいるが、これはこの近傍に発生データがあったことを示しているが、近くに大量の非発生データが存在するため、少数の発生データが存在しても判別境界面は、発生データの影響をほとんど受けず、大量にある非発生データにより構築される。したがって、RBFN を用いて解析を行う場合、あらかじめなげ崩れを「散発的」、「集中的」に分類する必要がなく、すべての発生データを用いた場合であっても再現性の高い普遍的な判別境界面の設定が可能である。

ここまでは個別斜面の情報が入っていないため、図 2 の判別境界面は降雨データが同じである地域では同じものとなる。この地域で一本の RBFN は著者が TLO に関係する以前に開発した技術であり、すでに論文⁹⁾で公表しているため、特許として権利化することはできなかった。このように特許として権利化しようと思えば、あらかじめ公表を控える等、周到な準備が必要である。

そこで、残る第一の問題を解消するため、以下のように個別斜面ごとの RBFN を用いた CL の設定手法を開発した。この技術は特許として成立したものである。

4. 個別非線形 CL の設定過程

ここで対象とする個別非線形 CL は、大別して以下に示す 4 段階によって設定される。図 3 に個別非線形 CL の設定フローを示す。以後、個別非線形 CL の設定は、この設定フローに従って行うこととする。なお、この設定に用いるデータとしては、下関気象台において観測されたアメダスデータと下関気象台を中心とする半径 5 km 以内にある危険箇所指定された自然斜面 239 斜面とした。

1. 斜面の崩壊危険度の算出および崩壊危険度ごとのグループ化
2. RBFN を用いた各グループの基本判別境界面の

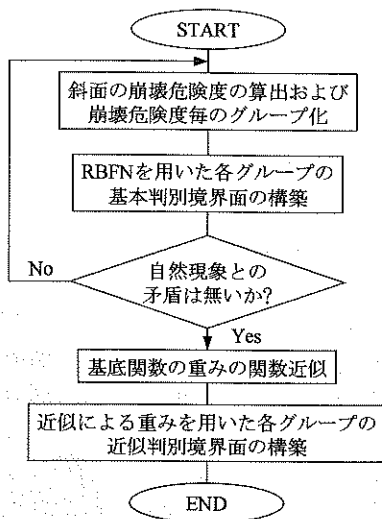


図3 個別非線形CLの設定フロー

構築

3. 基底関数の重みの関数近似
4. 近似による重みを用いた各グループの近似判別境界面の構築

以上の段階に従うことで、任意の崩壊危険度に対する個別非線形CLの設定が可能である。

5. 斜面の崩壊危険度の算出および崩壊危険度ごとのグループ化

5.1 崩壊危険度の算出方法とその妥当性

まず斜面の崩壊危険度の算出が必要であるが、ここでは従来から簡易な方法としてさまざまな方面で用いられている点数制^{7,8)}を用いて崩壊危険度の算出を行うこととした。その際、各斜面要因に与える点数の算出が必要となるが、ここでは従来の専門技術者の経験的な判断に基づくのではなく、実際の崩壊現象に基づいて算出する。具体的には、対象斜面においてこれまでにながれ崩壊が発生したか否かの対応付けを行ったうえで、斜面要因ごとにカテゴリー別発生率を算出し、その発生率を各カテゴリーの点数とする。最終的に得られた各要因の点数を合計し、その総得点で斜面の崩壊危険度を評価する。

斜面の崩壊危険度の算出に用いる斜面要因は、急傾斜地崩壊危険箇所点検（平成9年）で調査された地形要因、地質土質要因、環境要因、地震要因を用いる。

実際に算出した崩壊危険度の代表例を図4に示す。図4(a)には、定量的評価が可能な数値要因であり、崩壊現象を考へるうえで重要な要因とされる傾斜角の発生率を、また、図4(b)には、崩壊現象との相関があまり明確でないと推察される隣接斜面（状況）の発生率をそれぞれ示した。図中の■、□は各カテゴリーに属する発生斜面数、非発生斜面数をそれぞれ表しており、両者を合計したものが各カテゴリーに属する全斜面数である。また、図中の折れ線は、

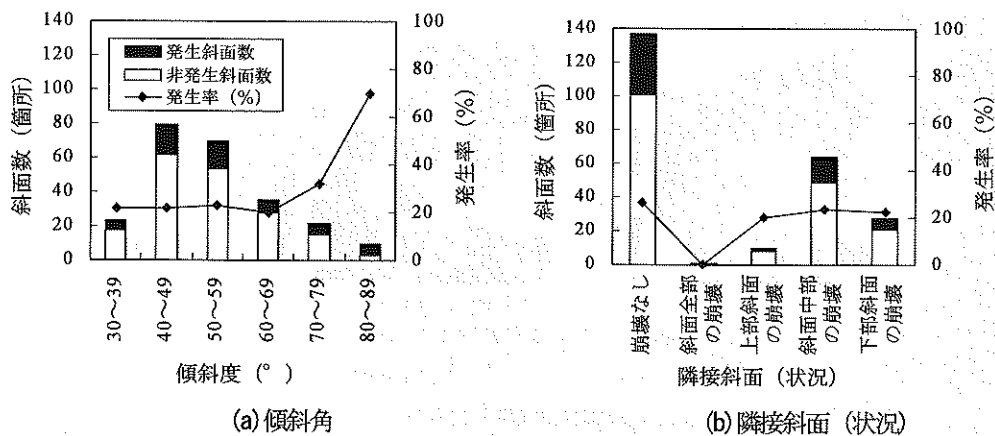


図4 斜面要因ごとの発生頻度および発生率

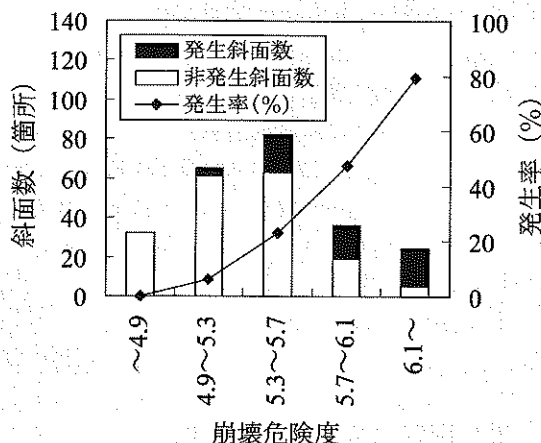


図5 各グループにおける発生頻度および発生率

各カテゴリーにおける発生率（発生斜面数/全斜面数）を示している。これらの発生率は上記の予測とほぼ一致した結果となっている。

上記の方法により得られたすべての斜面要因の点数を用いて算出した崩壊危険度と斜面数の関係を図5に示す。図中の横軸は崩壊危険度を表しており、数値の増加に伴い崩壊危険度が増すものとしている。

ここでは5グループに分類して、以後の解析を進めることとした。図中の■、□および折れ線は図4と同様である。

図5より、崩壊危険度が4.9未満に属する斜面においては対象期間中に1件のながれ崩壊も確認されていないのに対し、崩壊危険度が6.1以上の斜面では、そこに属する斜面の多くで崩壊が発生していることがわかる。また、崩壊危険度ごとの発生率に着目すると、崩壊危険度の増加に伴い実際の現象と矛盾なく増加する傾向を示している。以上のことから、ここで算出した崩壊危険度は、実際の崩壊現象を非常に良く再現できており、以後の解析に用いても問題ないと判断した。

6. RBFNを用いた各グループの基本判別境界面の構築

5.では対象斜面すべての崩壊危険度を算出し、それらを基に斜面のグループ分類を行った。ここでは、分類したそれぞれのグループ内での発生、非発生降雨要因を用いて、

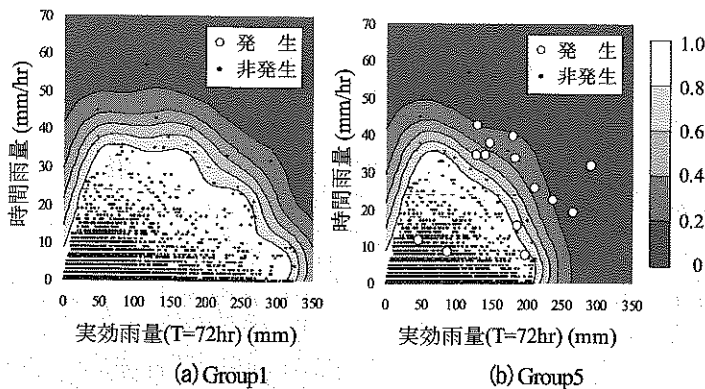


図6 各グループの判別境界面 (代表例)

グループごとに判別境界面の構築を行う。なお、ここで構築する判別境界面は、実際の降雨データに基づくものであり、8.で構築する重みの関数近似による判別境界面と区別するため、基本判別境界面と定義する。

構築した各グループの基本判別境界面の一例を図6に示す。図6(a)のGroup 1においては、豪雨を経験した場合であってもがけ崩れの発生が確認されておらず、基本判別境界面の安全領域(出力値0.8以上の領域)は広域となっている。図6(b)に示すGroup 5ではGroup 1よりも安全領域における実効雨量の上限が100 mm程度も小さくなっている。

7. 基底関数の重みの関数近似

6.で求めた基本判別境界面はあくまでも各グループの平

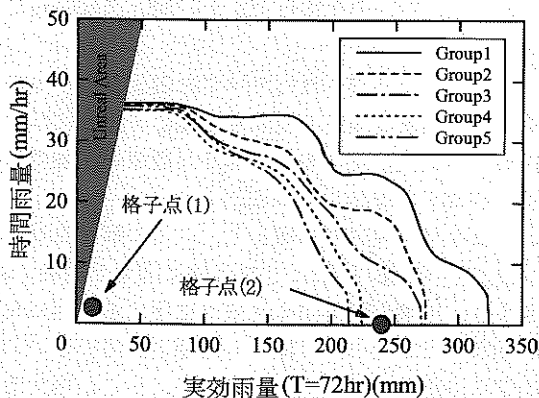
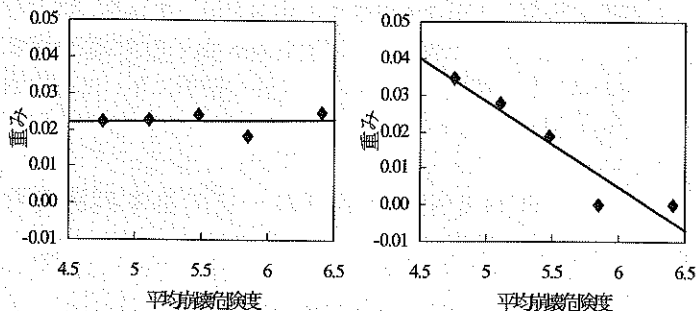


図7 各グループの基本判別境界面に基づく非線形CL



(a) 格子点(1)における重みの近似 (b) 格子点(2)における重みの近似

図8 基底関数の重みと平均崩壊危険度の関係

均的なものであり、斜面ごとに設定されたものではない。そこで、ここでは、任意の崩壊危険度における判別境界面の構築を試みるために、判別境界面を構成する基底関数の重みに着目し、その重みを崩壊危険度の関数として近似することを試みた。

各グループにおけるすべての基底関数の重みについて、格子点ごとに平均崩壊危険度との関係を検討した。その代表例として、図7の●で示した2箇所の格子点における検討結果を図8に示す。図8(a), (b)は、それぞれ図7に示す格子点(1), (2)の重みと平均崩壊危険度の関係を表している。なお、図中の直線は回帰分析によって得られた回帰直線である。

図7の格子点(1)周辺においては、図6からもわかるようにいずれのグループにおいても発生が確認されておらず、非発生降雨しか存在していない。したがって、格子点(1)における重みと平均崩壊危険度の関係を表した図8(a)においては、グループごとに重みが大きく変化する傾向はないことがわかる。一方、格子点(2)については、崩壊危険度ごとに基本判別境界面が大きく変化する領域であり、図8(b)においては崩壊危険度の増加に伴い重みが減少する傾向が確認できる。また、それぞれの回帰直線をみても、データの分布をよく再現できており、判別境界面と崩壊危険度の関係においても矛盾のない傾向を示している。また、多少のばらつきのあるデータの分布を関数近似することで、各グループの判別境界面の平均化を行うことができ、局所的な形状変化を軽減させることが可能であると考えられる。

以上のことから、任意の崩壊危険度における各格子点上の重みについては、この近似を用いて算出しても問題ないと判断した。

8. 近似による重みを用いた各グループの近似判別境界面の構築

ここでは、7.の関数近似によって得られた基底関数の重みを用いて、個別斜面の判別境界面を構築する。なお、ここで構築する判別境界面は、基本判別境界面と区別するために、近似判別境界面と定義する。

近似判別境界面は、7.で設定したすべての格子点の回帰直線に、斜面の崩壊危険度を代入して得られる重みを用いて構築する。図9は図6と同じGroup 1, 5の近似判別境界面を示している。

図より、このグループの近似判別境界面において、図6に示した基本判別境界面とほぼ同様な形状を呈しており、重みを近似した場合であっても判別境界面に大きな差が現れていないことがわかる。

また、図10には近似判別境界面に基づく各グループの非線形CL(以下、近似非線形CL)を示している。図より、近似非線形CLは、図7で示した基本判別境界面に基づく非線形CL(以下、基本非線形CL)とほぼ同様な形状となっている。

以上のことから、ここで提案した手法においては、

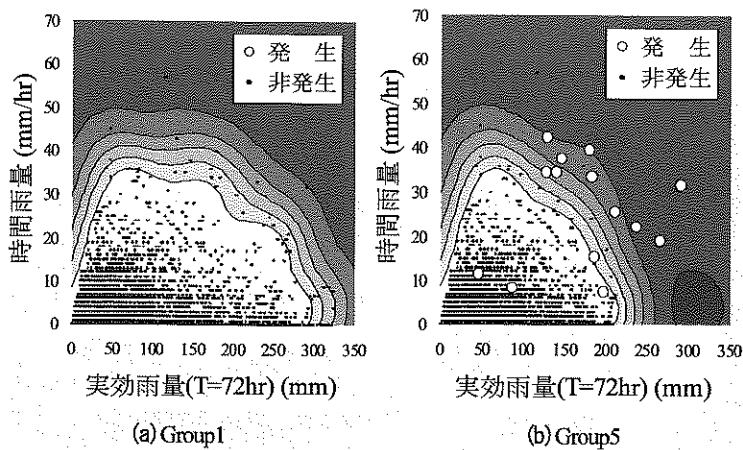


図9 任意の斜面の判別境界面 (代表例)

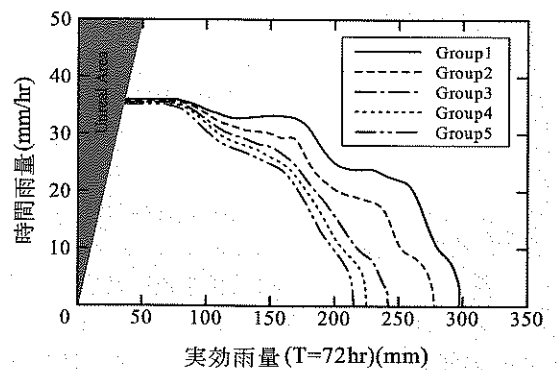


図10 各グループの近似判別境界面に基づく非線形CL

任意の崩壊危険度に対して、より再現性の高い判別境界面が構築できるだけでなく、構築に際してRBFNにより重みを算出する必要がないため、崩壊危険度を設定したすべての回帰直線に代入するだけで非常に簡易に構築することができることとなった。

9. 予測精度の検証

設定した個別非線形CLの有効性について検証するために、著者がこれまでに提案した2つのCL(個別斜面の線形CL⁹⁾、対象地域における非線形CL⁹⁾)と予測精度について比較を行う。

選定した発生、非発生データに対する各CLの正判別率の結果を表1に示す。ここで、発生の正判別とは、発生推定時刻までにCLに到達したことがある場合である。一方、非発生データの正判別とは、一連降雨において一度もCLに到達しなかった場合である。

表より、発生データの正判別率はすべてのCLにおいて100%となっており、対象とした発生データについてはいずれのCLにおいても変化がみられない。したがって、個別非線形CLの予測精度の評価については、各CLの非発生データの正判別率に着目して行うこととした。

各CLにおける非発生データの正判別率をみると、個別斜面の線形CLと対象地域の非線形CLではそれぞれ77.6%、77.0%と高い予測精度となっている。また、実際の捕捉数から年間平均の空振り回数を算出すると約1回/箇所となる。ここで、両者の精度を比較しても大きな差が

みられないことについては、各CLが従来の2つの問題点をそれぞれで対応し、他方の問題を解消することができていないためであると考えられる。

そこで、それらの問題点に対して同時に対応できる個別非線形CLの正判別率をみると、85.0%という正判別率を示しており、明らかに上述した他のCLよりも高い予測精度になっていることがわかる。また、実際の捕捉数は他のCLよりも2,000件程度も多くなっており、年間の平均空振り回数は0.64回/箇所とかなり空振り回数を軽減させることができています。

以上のことから、個別非線形CLについては、これまでに提案したCLよりもかなり予測精度の高いものであると言える。

10. コンサルタントにおける特許

4.から8.までが特許化(特許第3380871号)された内容である。読者の中には「こんなものが特許になるのか」と驚かれた方も多いかもしれない。確かにテレビとか半導体といった物を製造する特許はよく話題に上る。最近も青色発光ダイオードの特許をめぐる裁判と和解については大半の方が存じておられるであろう。

これに対して、地質や土木分野の、それもコンサルタント業界に特許は関係する特許はいわゆるビジネスモデル特許に近い。ここで紹介した特許も、土砂災害の発生限界雨量線を引く方法の特許である。多分一般の人にはなじみが薄い特許と思われる。しかしこれこそが、地質・土木分野のコンサルタントと今後関係が深くなる特許と思われる。筆者の属する山口TLOでこれらの特許の先行技術調査を行った結果を見ても、地質・土木分野の特許は決して多くなく、今後有望な分野と思われる。

すでに何度も述べたように、本誌の読者が多く属していると思われる地質・土木分野のコンサルタントは従来ほとんど特許とは関係がなく、特許を取得しておられる会社も少ないと思われる。しかし今後国内・国外の競合状況がますます激しくなると考えられ、他者の参入を抑制して自社で開発した技術を守るにより収益を確保する

表-1 各CLの正判別率一覧表

		個別線形CL	地域非線形CL	個別非線形CL
発生	対象データ数	40	40	40
	正判別数	40	40	40
	正判別率(%)	100.0	100.0	100.0
非発生	対象データ数	24,651	24,651	24,651
	正判別数	19,153	19,001	20,956
	正判別率(%)	77.6	77.0	85.0

方向に向かうことは必然であろう。日本という国自体もその方向に急速に向かいつつある。そのことを理解したコンサルタントはすでに特許を仕事の中に取り入れつつある。

上で述べた特許も、中電技術コンサルタント(株)、(株)エイトコンサルタント、八千代エンジニアリング(株)、西日本技術開発(株)と4社に通常実施権を付与し、いくつかの県の業務で実際に使われている。

筆者も上の特許とは別に公共事業をどの順で行うことが合理的かといった順位付けの特許(特許第3421696号)や複数の要因から災害発生のルールを特定し防災事業計画の支援を行う特許(特許第3501454号)などもすでに取得し、この分野で特許を核にした事業展開のモデルを作りたいと日夜全力を傾けている。

日本が世界中の国々と競争して繁栄していくためには、技術を重視する以外にないことは周知の事実です。地質・土木分野でも特許重視による技術の囲い込みが常識になる日が近いうちに来るのは確実ではないかと思えます。そういった意味で、冒頭で述べたように「特許なんて関係ない」と言わず、皆さんの日常業務で行っておられる仕事も特許という形で保護し、活用できることを知っていただけたら幸いです。

参考文献

- 1) 全国地すべりがけ崩れ対策協議会：土砂災害防止法「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」について、パンフレット、2000。
- 2) 建設省河川局砂防部：総合土砂災害対策検討会における提言および検討結果、pp. 29-35, 1993。
- 3) 石川芳治：降雨量を用いた土石流の警戒・避難基準、新砂防, Vol. 43, No. 2, pp. 40-47, 1990。
- 4) Orr, M. J. L.: Introduction to radial basis function networks. Technical report, Institute for Adaptive and Neural Computation, Division of Informatics, Edinburgh University, 1996。
- 5) 倉本和正・鉄賀博己・東 寛和・荒川雅生・中山弘隆・古川浩平：RBFネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究、土木学会論文集, No. 672/VI-50, pp. 117-132, 2001。
- 6) 倉本和正・守川 倫・鉄賀博己・荒川雅生・中山弘隆・古川浩平：斜面要因を考慮した斜面毎の非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定手法とその崩壊予測精度、土木学会論文集, No. 707/VI-55, pp. 67-81, 2002。
- 7) 山田剛二、渡 正亮、小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の実態と対策, pp. 426-431, 山海堂, 1971。
- 8) 財団法人 道路保全技術センター：平成8年度 道路防災総点検要領(豪雨・豪雪等), pp. 30-45, 1996。
- 9) 倉本和正・鉄賀博己・菊池英明・守川 倫・門間敬一・古川浩平：急傾斜地における斜面要因を考慮した崩れ発生限界雨量線の設定手法に関する研究、土木学会論文集, No. 658/VI-48, pp. 207-220, 2000。

遺跡保存剤の開発とその応用例

とよだ まさひろ*
豊田 昌宏*

1. はじめに

遺跡保存剤およびそれをを用いた保存方法の開発の発端は、劣化の進むマヤ遺跡「土造り神殿」を遺跡として残すために、1991年開始されたメソアメリカ学研究所のプロジェクト「エル・サルバドル総合学術調査団」(団長大井邦明京都外国語大学教授)における研究が行われた際¹⁾、(株)田中地質コンサルタント(本社:福井県武生市, <http://www.geology.co.jp/>)代表取締役田中保土氏が保存科学班に参画され、その遺跡を強化保存する必要性に迫られたことから始まる。この時、田中氏の要求にこたえ、筆者(当時福井工業高等専門学校物質工学科)と共同研究が始まった。

野外にある石あるいは土でできた文化財の風化・劣化の発生は多様であり、その多様性は、場所や岩石の種類に応じて作用が異なってくる。この風化は、物理的、化学的および生物的なものに分けて考えることができる。物理的風化には、熱風化、乾燥風化、凍結粉砕、あるいは塩類風化などがある。化学的風化には、炭酸塩化と溶解、酸化、加水分解などがある。生物風化は、バクテリアによる硫黄、鉄などの酸化、菌糸・地衣類などによる鉱物の破砕、木の根の根圧による岩石の割れ目の拡大等が上げられる。土製あるいは石でできた建造物は発掘された時点から、以上のような劣化を免れることはできず、その保存のために、たとえばシリコン樹脂を用いることが検討されている。

近年、ユニセフを主体とするものだけでなく、各国政府から小さなNPO法人に至るまで、多くの団体が世界に残る遺産として、遺跡・遺構を修復保存し、観光資源・教育材料に活用する気運が高まってきている。また、公共工事に伴う遺跡の発掘調査届出件数は、その事業の増加とともに急激に増加している。しかしながら、野外にある磨崖仏、石仏、五輪塔などの石造品や、土製の遺構などについては、保存処理に困難な点も多く、さまざまな保存処理方法が試行錯誤されている。特に土や石製遺物の保存には、アクリル樹脂あるいはエポキシ樹脂が多く用いられている。これらの処理方法は煩雑な上、処理後の乾燥に長時間を要し、処理後遺構の表面に照りや暗色化が見られ、遺跡・遺構と

して自然に近い状態で保存することは難しい。また、使用されている有機溶剤は、必ずしも人体にとって良い物ではなく、環境汚染物質となりうる物も見受けられる。そこで、保存処理現場からはさらに良い、すなわち、人体にとっても安全で、環境に優しい強化保存剤が求められてきている。

(株)田中地質コンサルタントと共同で開発された遺跡・遺構の強化保存剤(商品名TOT)は、ケイ素を含有するアルコキシド溶液に、エチルアルコール等を溶剤として加え、そのアルコキシド溶液に水を添加し、部分加水分解重縮合させたものである。本薬剤溶液を保存あるいは強化対象物に、塗付・散布あるいは含浸することにより浸透させ、粒子間で薬剤を重合固化させることにより、強度の向上を図ることができるようにしたものである。これまで使用されてきた、高分子樹脂系薬剤と異なり、浸透性に優れ、乾燥も早く、また、使用している材料がケイ素(Si)のみであることから、元来の土の成分と差がなく、自然に近い薬剤と比べて過言ではない。さらに、これまでの保存剤に有機溶媒として多く使用されているケトン類を全く使用せず、エチルアルコールを使用していることから、人体や環境に優しいクリーンマテリアルタイプの強化保存剤である。

これまでこのTOT等で多くの成果をあげてきている。それらの成果と、今後の展望、今後さらに考えられる技術についても考え述べてみたい。

2. 具体的事例

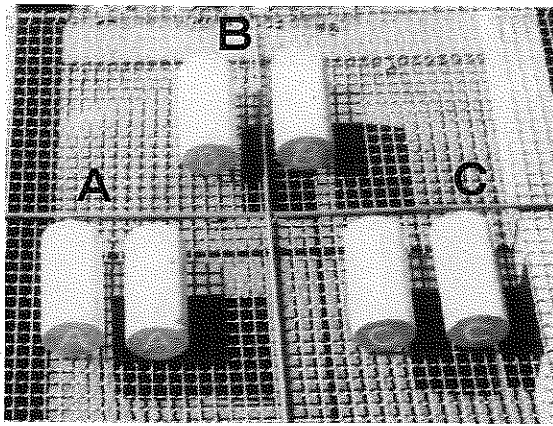
2.1 使用に際して

遺跡・遺構の保存に際しては、経時変化のないことが要求される。以下の主要試験により、耐久性の確認を行った。また、使用に際して、変色、照りが生じることは厳禁で、これについても考慮し開発を行った。

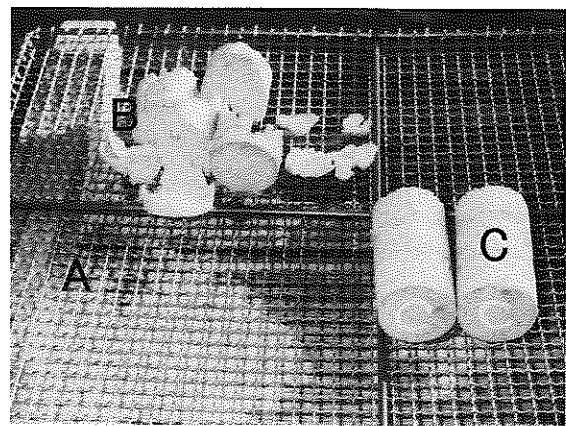
(1) 野外風化耐久性試験²⁾

三層突き固めにより作製した試料に遺跡・遺構の強化保存剤(以下TOT)の霧吹き処理と含浸処理を施し、野外に放置して風雨や直射日光にさらした。試験は梅雨時期の1997年7月1日に開始した。その間、日照りや豪雨、台風および福井県の豪雪なども経験したが、TOT含浸処理を行った試料は、1年以上の完全な形状を保った。なお、TOT

* 大分大学工学部教授 応用化学科

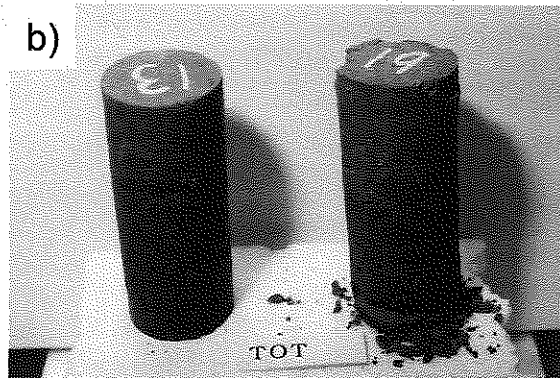
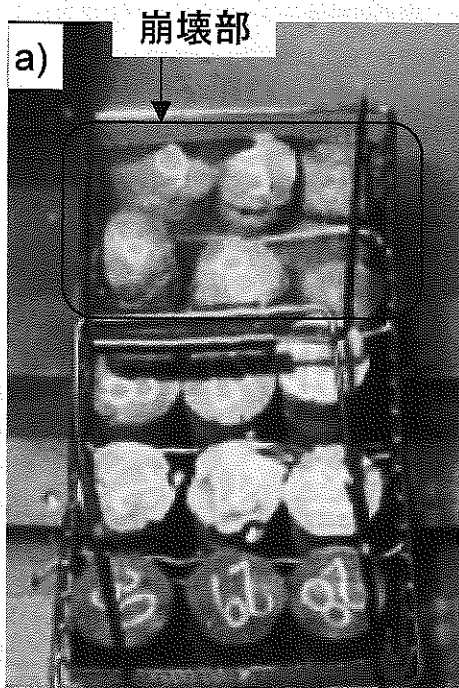


A: 無処理試料,
B: TOT 霧吹き処理, C: TOT 含浸処理



A: 崩壊 存在せず,
B: TOT 霧吹き処理 崩壊残存,
C: TOT 含浸処理 形状を維持

写真1 野外暴露試験



左: 未凍結融解試料, 右: 凍結融解5回繰り返し

1) 含水状態, 未処理では崩壊が始まる, b) 凍結融解5回繰り返し後

写真2 凍結融解試験

処理によって変色や照りは全く生じなかった。経時変化に伴う形状の変化を写真1に示す。未処理の試料では、形状を全く残さず崩壊したのに対して、霧吹き処理で表面のみ塗布をした物は崩壊にとどまり、含浸により内部まで含浸させた物は、長期にわたりその形状が維持され、優れた処理効果を示した。

(2) 凍結融解試験³⁾

強化保存処理の耐久性は、保存を考えるうえで重要な点である。耐用年数を明らかにするため、風化促進試験の一つである凍結融解による耐候性試験を行った。砂質および粘性土をそれぞれ円柱状に成形して試料とし、TOTによる処理を行った後、+20°Cの水に12h、-20°Cの冷凍庫に12h保存し、凍結-解凍を繰り返し行った。水飽和した状態で急速に冷却するという試験条件は、自然界にない非常に厳しいものであるが、無処理の土は、凍結しなくても、

最初の水浸時に崩壊が始まり、砂土の場合は水浸後十分で完全に崩壊した。しかしながら、TOTで処理した土は、砂質の土、粘性土とも5回繰り返し後もその形状を保った。代表的な凍結融解試験に伴う形状の変化を写真2に示す。厳しい条件においても、著しい形状の崩れが認められなかったこの結果は、土の強度が向上した結果を示すもので、土の強化に適した材料であることが示された。

2.2 TOT処理による粒子間結合の解析

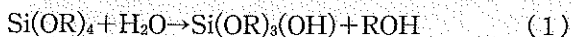
シリコンアルコキシドを主原料とするこのTOTは、遺跡、遺物の粒子間に含浸し、アルコキシドの加水分解反応に伴い、粒子間の結合強化を促進していると考えられる。実際に遺跡、遺構の中でどのような状態で存在しているか、反応後に存在すると考えられるSiO₂の存在状態について、その存在を確認するために、セラミックスペレットで

モデル化を行った。TOT を含浸させた試料で、粒子間でのような状態で存在するかエネルギー分散型 X 線分析 (以下 EDX) を用い明らかにし、また加水分解に伴う結合強化機構について考察を行った。

粒子間での結合状態を分析するためのセラミックス材料としてアルミナ (Al_2O_3) を選び、加圧成型により、ペレット状に成型した。このセラミックスペレット内部まで十分に溶液が含浸するように、TOT 溶液中で 6 h 含浸させた後、溶液から取り出し、空气中で自然乾燥させ試料とした。この試料と比較のためのバルク試料について、ペレット内部の形態を電子顕微鏡で、粒子間の結合状態の確認のための元素分析を EDX にて観察した。

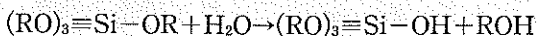
(1) 遺跡中の強化保存剤

モデル化に用いたアルミナペレット内部は、粒径 2~5 μm の均一の粒子が認められた。TOT を含浸させたところ、TOT の分解・反応による結晶が析出したような箇所は認められず、バルク体のペレット内部と TOT 処理したペレット内部の粒子状態には、差がなかった。したがって、溶液の反応は粒子表面あるいは粒子間の空隙で起こっていると考えられた。EDX によるペレット内部の元素分析結果でも、粒子間の空隙に Si が認められ、粒子間あるいは表面に均一に存在していることがわかった。また、元素分析の定量の結果から、試料本体の Al 元素と同等の Si が存在していることから粒子の間隙にまんべんなく存在していると考えることができた。したがって、試料を溶液中に含浸させることで、粒子間に沿って溶液が内部まで入り込み、空隙、粒子間でアルコキシドが溶液調整時に添加された水あるいは用いた試料内に包含していた少量の水と反応し、加水分解重縮合が起こっているものと考えることができた。反応機構としては、シリコンアルコキシドを主成分としているので反応をシリコンアルコキシドで考えた場合、式(1)の反応が考えられる

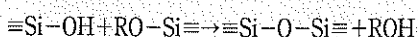


この式(1)の加水分解反応は、急速に起こり、溶液中の $Si(OR)_4$ 分子は、出発混合溶液を調整した時点でほとんどなくなると考えることができる。したがって原料溶液を調整した時点では、ケイ酸分子は生じていないことになり、反応(重縮合)は、時間の経過とともに粒子間、空隙で進行していると考えてよい。この場合の考えられる重合は以下のようなものが挙げられる。

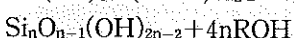
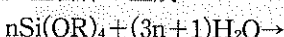
加水分解



縮合



一次元重合体の生成



使用している触媒、水の量を考えると、比較的一次元の重合体を生成しやすく、それらが土・砂に含まれる水酸基等と結合することで強化されていると推察された。この粒子間の反応がもろい土の強度の向上に繋がっている

と考えられた。

2.3 TOT による文化財の保存処理—玉名五輪塔—

玉名五輪石塔(玉名市立願寺大字松尾、立願寺松尾遺跡)では、石塔の現状での保存が要求されている。それらを TOT で処理を行った。評価項目として、硬度および乾湿繰り返しによる強度・形態変化、また、処理に伴う色彩変化についても検討を行った。

玉名五輪塔の試料は、石塔の一部(破片)を玉名市教育委員会よりお借りした。石片の試料は TOT 溶液中にそれぞれ 1 h、24 h 含浸させた。比較のために、ワッカー社製 OH に 1 h 含浸させた試料を準備した。試料の詳細を表 1 に示す。

表面硬度の測定については、携帯用万能硬さ試験機(エコーチップ D 型、スイス製)を用いて薬液処理前と 3 週間養生(常温)後の表面硬度を測定した。試料の一部に 1 cm 四方のグリットをうち、そのグリット内 9 箇所を測定し、その平均値を表面硬度として用いた。色彩比較試験については、遮光筒式色彩計(色彩計 520-02、横河インスツルメンツ(株))で薬液処理前と 3 週間養生(常温)後の色度値および明度 (a^*b^* 表色系)を測定した。乾湿繰り返し試験については、薬液処理後 3 週間養生(常温)した試料で試験を行った。まず、試料を乾燥炉(120°C)で 24 時間乾燥し、デシケータ内で常温まで冷ましたのち、乾燥重量 (W_d) を測定する。その後試料を 72 時間水浸したのち、水中重量 (W_s) と表乾重量 (W_w) を測定する。これを 10 サイクル繰返した。

$$\text{○見掛体積 } V_{app} = W_w - W_s$$

$$\text{○見掛比重 } \rho_{app} = W_d / (W_w - W_s)$$

$$\text{○含水比 } \omega = W_w / (W_w - W_s)$$

$$\text{○有効空隙率 } n(\%) = (W_w - W_d) / (W_w - W_s) \times 100$$

$$\text{吸水率 } p(\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100$$

石塔試料の強度試験を行った結果、強化保存処理を行うことにより、130%の強度の増大が認められた。通常、石の処理により強度が向上することは、その構造上きわめて難しいとされているが、緻密な石への処理によっても強度が向上することが認められた。

色彩計による色度の変化は、いずれの試料においても、処理直後に色度値の変化は認められるが、処理後時間の経過と共に(処理した薬液の乾燥とともに)、色度値および明

表 1 阿蘇凝灰岩試料(玉名五輪塔石塔試料)

Sample	見掛体積 V_{app} (cm^3)	見掛比重 ρ_{app} (g/cm^3)	有効空隙率 n (%)	吸水率 p (%)	処理方法
1-1	1040	1.42	29.81	21.05	未処理
1-2	1171	1.25	35.18	28.18	TOT 24 h 含浸
2-1	2120	1.28	34.25	26.74	TOT 1 h 含浸
3-1	395	1.32	35.19	26.68	OH 1 h 含浸

表2 乾湿繰り返し試験

Sample	1 サイクル			10 サイクル		
	V_{app} (cm^3)	$\rho_{app,d}$ (g/cm^3)	ω (%)	V_{app} (cm^3)	$\rho_{app,d}$ (g/cm^3)	ω (%)
1-1	1039	1.41	1.71	1050	1.39	1.68
1-2	1165	1.29	1.62	1164	1.28	1.61
2-1	2109	1.32	1.65	2107	1.32	1.64
3-1	395	1.44	1.71	394	1.43	1.68
	n (%)	p (%)		n (%)	p (%)	
1-1	29.93	21.21		28.57	20.53	
1-2	33.39	25.88		33.25	25.97	
2-1	33.05	25.00		32.08	24.32	
3-1	27.85	19.40		25.38	17.76	

度 ($a^*b^*l^*$ 表色系) は、元の数値に近づき、処理による色の変化はほとんど認められなかった。

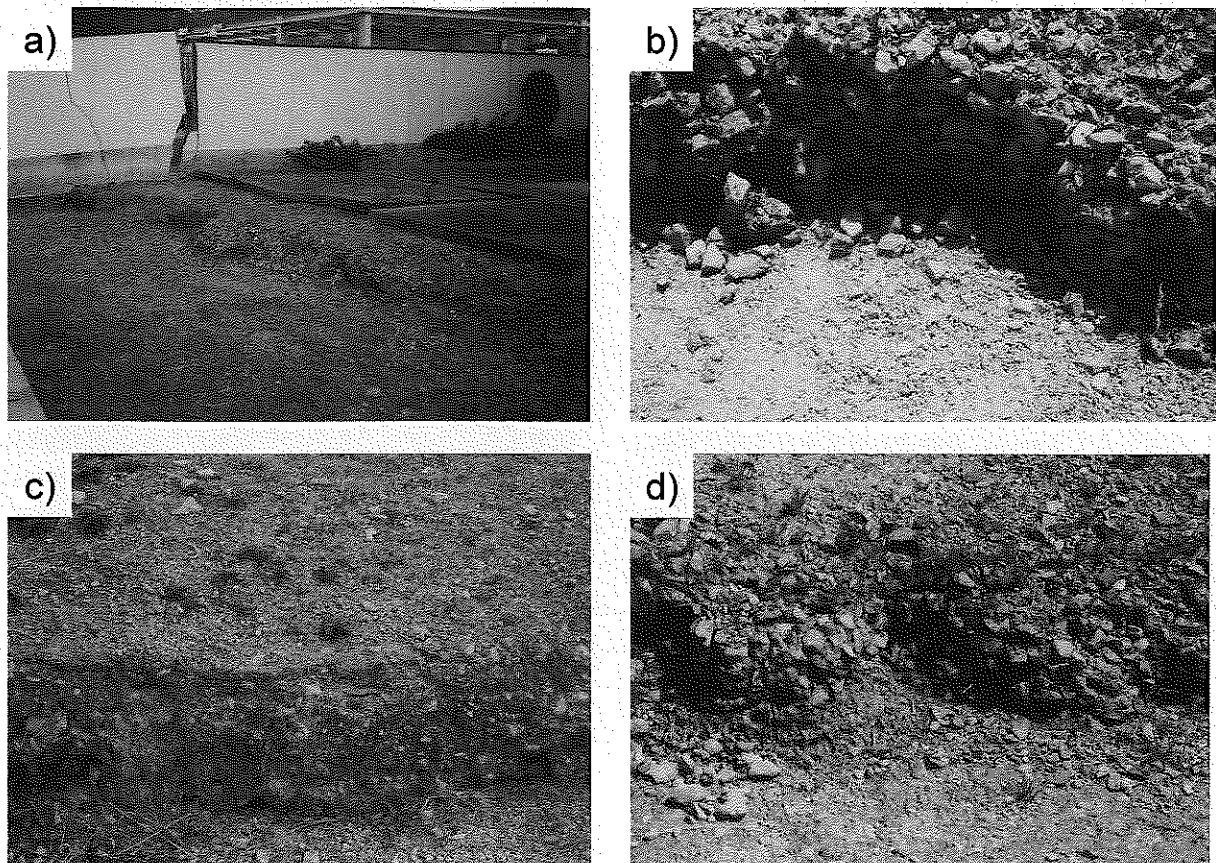
乾湿繰り返し試験の結果を表2に示す。10回まで試験を繰り返したところ、初期状態と比較して際立った変化は認められない。OH 処理品 (sample 3-1) では、処理に伴い吸水率に大きな変化が認められた。吸水率の低下は、水分、湿度の透過性が劣ることを意味し、遺跡・遺構に適用された場合、内部からの水分の蒸発を妨げることになる。これは、内部に水分をため込みやすく、寒暖差により、内部からの崩壊を導くことになる。一方、TOT 処理では、初期とほとんど変化がなく、きわめて本来の形に近い、自然の状

態で保存できると推察された。

石塔への強化保存処理では、乾湿繰り返しに伴う際立った変化も認められず、色彩の変化も小さく、石材に対しても有効な処理手段であると結論づけられた。

2.4 TOT による文化財の保存処理 —野島断層—

阪神・淡路大震災で出現した野島断層を保存、後世に残すことが震災を経験した我々の使命の一つである。実際の保存館の屋内展示場では、従来のこれまで遺跡・遺構の保存に適しているとされ、多くの場所で使用された実績を有する樹脂を用いた断層の保存が行われている。しかしながら、乾燥に伴うひび割れを防ぐため、散水等により、「カビ」、「こけ」、「雑草の発生」、あるいは「虫の繁殖」と問題が多く発生し、特に虫の発生により断層の崩れが始まっている。この結果は、従来の樹脂固化剤が断層等の保存に必ず適していないことを示す結果ともいえる。そこでTOT 処理を、さらに環境の厳しい、風雨にさらされる屋外での使用を試みた。TOT 処理は、断層面を中心とした約 $1.5 \times 10 \text{ m}$ の部分を処理した。使用量は、約 1 m^2 ごとに 1.5 L を目安として処理を行い、 15 m^2 の処理が終わった後、約 1.5 時間乾燥させた。同様の処理を2回繰り返し、最終的には $4 \text{ kg}/\text{m}^2$ の分量で処理を完了した。処理の際、断層面とその周辺 10 cm 幅に関しては、洗浄瓶 (500 ml) による処理を、



a) 処理前断層部分, b) 処理前断層部分拡大, c) 処理後, d) 処理後約2年

写真3 野島断層処理

断層の上面および下面の平らな所に関してはじょうろにより処理を行った。この出現した断層の経時変化を観察した。写真3に処理前後の形態変化を示す。現在、処理後3年以上経過したが、処理した断層部分ではほとんど変化がなく、きわめて良好な保存結果を示しており、遺構・遺跡のみならず、断層等の露頭面の保存に対してもきわめて有効であることが明らかとなった。

2.5 台湾「921 シャローホー断層」の保存シリカ含有液を用いた土と石の露頭面強化保存新技術

1999年9月21日に台湾で発生した地震で出現した断層等を保存するために、「921地震教育園区(台湾大地震断層)」と言う名称の保存施設が作られた。その施設の内に建設される車籠埔(シャローホー)断層保存館内の顕著な断層部分(台中縣霧峰村光復,旧光復中学校グラウンドにあらわれた断層)の保存に、野鳥断層の野外での断層保存の実績から、砂礫を含む断層に使用可能であるか、現地での塗布による試行調査を、田中氏(前出,田中地質コンサルタント(株)社長),加藤氏(兵庫県立人と自然の博物館,主任研究員)および著者により確認を行った(写真4)。その結果、砂礫を中心とした現地の土質に十分に使用可能であることが明らかとなった(現地砂礫土の参考写真,写真4)。施行は本年度から予定されている。

その他の保存例を以下に示す

2.6 柴田神社石列遺構(福井県福井市)

柴田勝家が築城した北の庄城の天守閣と伝えられている柴田神社において、笏谷石製の石垣遺構が福井市教育委員会により発掘された。この石垣遺構を野外で展示・保存するために、1998年3月、強化保存処理を行った。処理後約7年が経過したが、経時変化は全く認められず、良好な保存状態を示している。

2.7 三峰山城跡(福井県吉田郡松岡町)

福井県吉田郡松岡町にある三峰山城跡は、南北朝期の築城当時の姿をはっきりとどめており、中世史を解明する手がかりを与える貴重な遺跡となっている。三峰山城跡の切岸遺構の一部にて強化保存剤による処理試験を1998年5月に行った。風雨にさらされ、冬には雪の積もる厳しい自



写真4 地震露頭面処理, シャローホー断層

然条件にも関わらず、処理後約6年以上が経過した現在も、土表面の外観は変わらず、雨水による浸食や風化から遺構面を保存しており、本保存処理剤が、非常に有効であることが明らかとなった。

3. 新たな保存材料の開発

遺跡・遺構の多くは、砂漠を中心としたところに多く認められ、砂質土に対応した処理剤の必要性については、田中氏(前出,田中地質コンサルタント(株)社長)と検討を行ってきたが、その開発にまでは至っていなかった。前述の車籠埔(シャローホー)断層で砂礫を多く含む土へのTOT処理を試み有効な結果を得たが、砂礫を多く含む土の場合、浸透性が高く、また、空隙が大きいことから、TOTの粒子間での結合強化が望みにくく、これまでのTOT処理と同等の強度を得るためには、処理剤を多量に必要とすることが明らかになり、新たな処理剤の必要性を再認識した。

従来、空隙が多く脆い砂質土、砂質岩には、樹脂で空隙を埋めることが試みられていたが、通気性が劣ること、変色が認められることなど適切な方法ではないとされながらも、それに替わる物がなかった。そこで、これまでのSiアルコキシドの加水分解重縮合による結合強度の増加、重縮合の後にも通気性の良さを失うことがないといった特性を、砂礫土、砂質土および砂質岩に適用すべく、Siのアルコキシド溶液からの無機高分子とエポキシ樹脂のような高分子材料と組み合わせることにより無機-有機ハイブリッド剤の開発を試みた。新しく開発された薬剤(砂質土の強化保存剤,以降TOT-V)は、粘稠性を有し、空隙を埋め強度を高めることが期待された。

3.1 無機-有機ハイブリッド剤の開発³⁾

(1) 処理溶液

ケイ素を主成分とするアルコキシド溶液にエポキシ系樹脂を混合添加し、加熱攪拌、精製を行うことにより、ケイ素-エポキシ、すなわち無機-有機ハイブリッド剤(TOT-V)を合成した。三層突き固めにより作製した砂質土の試料を作製し、それをTOT-V溶液に含浸し、12h放置した。含浸後、風乾により120h乾燥し、完全に乾燥させた。乾燥させた試料から、酸あるいはアルカリ成分が流れ出すと環境汚染の根源になることから、溶出液中のpHの確認を行った。測定は、試料を500mlの蒸留水中に2h含浸し、液体部分のpHを(掘場製作所, pH meter D-12)測定した。

(2) 乾湿試験および凍結融解試験

TOT-V処理の耐久性は、三層突き固めにより作製した砂質土試料(試料条件:表3)をTOT-V溶液に6および24h含浸処理し、含浸後、50°Cで36h乾燥を行った。なお、比較のために、TOT処理試料を作製した。乾湿繰り返し試験は、TOTおよびTOT-Vで処理した試料を12h水浸した後、送風低温乾燥器を用いて110°Cで12h乾燥させ、これを1サイクルとし、5サイクル毎に状態を観察した。また、凍結融解試験は、TOTおよびTOT-Vで処理した試料

表3 試料作製条件

項目		単位	測定値
一般	土粒子の密度 ρ_s	g/cm ³	2.684
	自然含水比 w_n	%	17.98
粒度	礫分 2~75 mm	%	59.1
	砂分 75 mm~2 mm	%	33.9
	シルト分 5~75 mm	%	7.0
	粘土分 5 mm未満		
最大粒径	mm	26.5	
分類	分類名	—	細粒分まじり砂質礫

を12h水浸した後、フリーザーを用いて-25°Cで12h冷凍し、これを1サイクルとして5サイクルごとに状態を観察した。

(3) 破壊試験

試料の圧縮破壊試験は、破壊試験器（島津製作所 オートグラフ AGS-H 5 kN）を用い、一軸圧縮試験方法（JIS A 1216: 1998）に従い破壊試験を行った。試料の破壊状況との破壊強度値を測定した。

(4) 結果と考察

TOT-V 溶液で処理された試料からの溶出液の pH は、いずれにおいても 7.3~7.8 の範囲にあり、処理による pH の変化は認められなかった。一般に、植物の生育する土壌の pH は、5~8 の範囲であり、TOT-V 処理に伴い、降雨により流出する溶液は、植物の生育、環境に影響を与えることはない判断され、本処理剤は、環境に優しい処理剤と考えて良い。また、TOT-V 溶液で処理された試料を溶出試験のため、水につけたところ、写真5に示すように無処理のもの、水につけることで、崩壊が始まったのに対し、

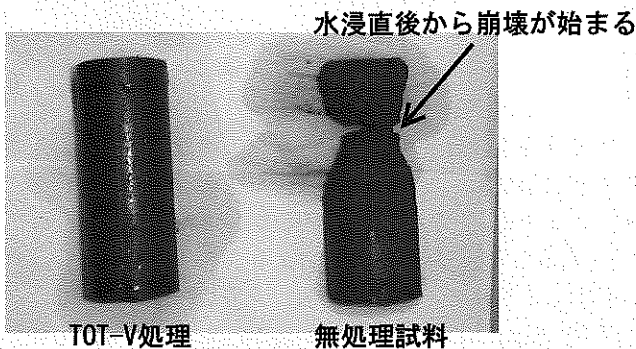


写真5 TOT 処理後、水に含浸

強化処理されたものでは、全く、変化が認められなかった。このことから、砂質土粒子間で強力に結合していることが推測された。

TOT-V および TOT 溶液での乾湿繰り返し試験の結果は、6h 処理では、1 サイクルから崩壊が認められたが、24 h 処理では、5 サイクル終了時において、TOT および TOT-V で処理した試料に大きな変化は認められなかった。この結果より、崩壊を防ぐ粒子間の間隙を強固に結びつけるための最適含浸量があることが明らかとなった。一方、加速試験として、凍結融解試験を行ったところ、6h 処理では、1 サイクルから崩壊が認められたが、24 h 処理では、TOT においては、4 サイクルから崩壊が始まったが、TOT-V で処理した試料においては、5 サイクル終了時において変化は認められなかった。写真6(a)に TOT-V および TOT 溶液で 24 h 含浸処理を行った後、写真6(b)に凍結融解を 5 サイクル繰り返した後の形状写真を示す。TOT および TOT-V を比較したところ、TOT-V では、過酷な凍結融解でも崩壊が認められなかったことから、本 TOT-V 処理溶液は、砂質あるいは砂礫土の強化に適した材料であることが示され、この溶液で処理を行った場合、TOT と同様に長期にわたって強化保存が可能であることが示唆された。

一軸圧縮試験による破壊試験の結果を図1に示す。未処理および従来の TOT で処理された試料と比較して、

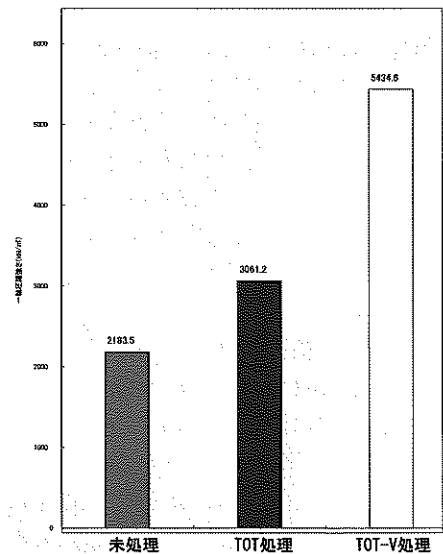


図1 処理剤の違いによる一軸圧縮強さの比較

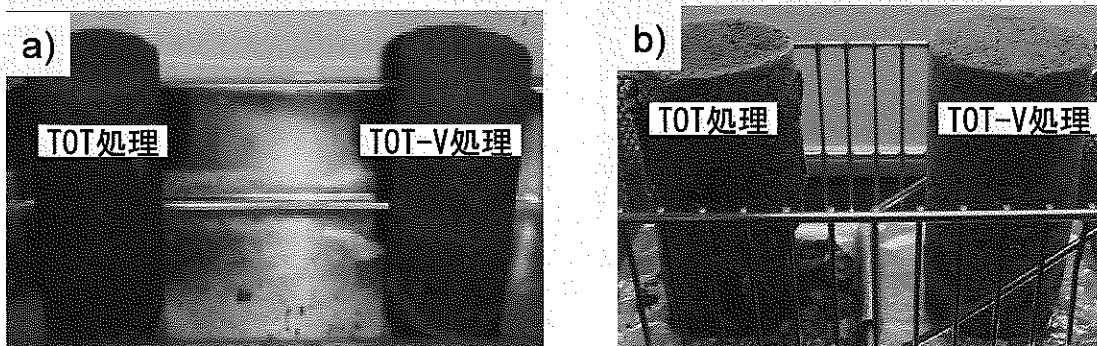


写真6 a) TOT-V および TOT 溶液で 24 h 含浸処理後、b) 凍結融解を 5 サイクル繰り返した後
写真6 凍結融解試験に伴う形状の変化

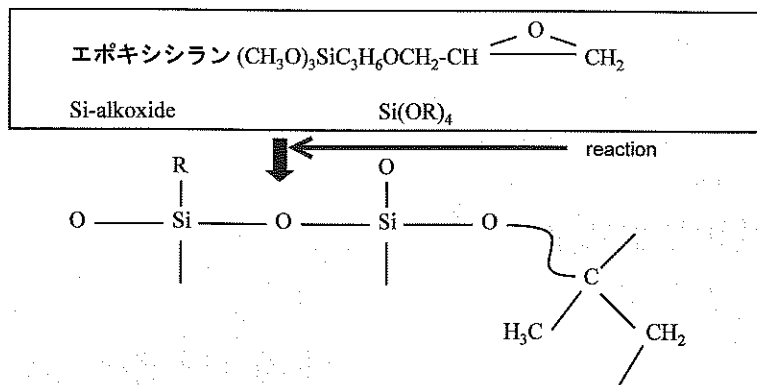


図2 予想される構造

TOT-V 溶液で処理された試料では、強度比で2~2.5倍のきわめて高い値を示した。TOT-Vによる処理では、エポキシ樹脂とSiの重縮合による高分子化によって(図2参照)粘稠性を有する溶液と変化する。この溶液は、砂質あるいは砂礫土に多く含まれる、大きな空隙に対し、それを埋めるように働き、その結果、強度の増大と耐水性の向上を可能とした。この結果は、砂質あるいは砂礫を多く含むような母体、すなわち、先の野島断層、車籠埔(シャローホー)断層といった、露頭面への使用にも十分耐えるものと考えられる。

3.2 TOT-Vを用いた杣山城跡・居館跡の保存修復

TOT-Vを鎌倉時代末に築かれたとされる、国指定史跡「杣山城跡の居館跡」(福井県南条町)の、土塁などの遺構に使用し、その遺構の保存を試み、経時変化等について観察を行った。屋外での試験地として、水分を多く含む軟弱な地盤である「杣山城跡の居館跡の土塁」を選び、使用した。その経時変化を追跡・観察した。

(1) 結果と考察

屋外試験として、「杣山城跡の居館跡」の、土塁に使用した場合の、処理後、数ヵ月の経時変化を写真7に示す。福井の冬の降雪、低温を繰り返しているにもかかわらず、その外観に全くの変化は認められず、きわめて良好な結果を示した。結合の弱い軟弱な地盤に対し、砂質土用に新しく開発された、無機-有機ハイブリッド改質TOT-Vは、従来の高分子樹脂と異なり、特別な前処理も必要とせず、浸透性も高いことから、簡便な処理により強化保存が行えた。

4. まとめ

土および砂質、砂礫土に適した遺跡・遺構強化保存剤、TOTおよびTOT-Vを開発し、その処理効果について検討を行った。いずれの溶液で処理された試料も、含浸試験において水中で分解することもなく、優れた処理効果が示された。TOTおよびTOT-Vいずれの保存剤も、粒子間に

未処理 TOT処理 TOT-V処理

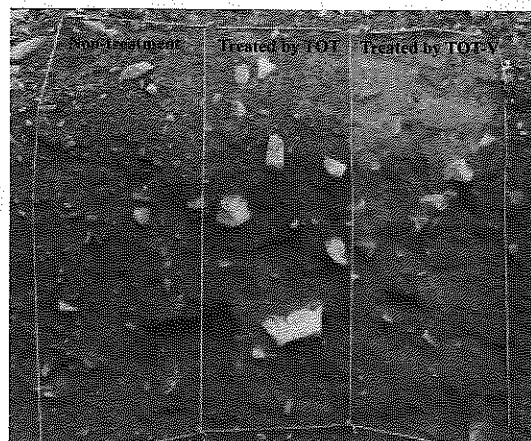


写真7 杣山城跡の居館跡の土塁

浸透し、粒子間の結合を強化することにより、強度の増大と、耐水性の向上を可能とした。土質以外で補修、補強が困難とされていた砂質、あるいは砂礫土でも使用、補強が可能となったことは、使用可能範囲を広げた。この結果は、露頭面への使用にも十分耐えるものと考え、露頭面(断層)への使用に際しても、十分な強度増大効果を示した。また、使用に際し、従来の溶剤に比べて安全であり、また、溶出液にpHの変化もないことから、植物の生育に影響はなく、環境に優しい、強化保存剤といえる。砂漠に多くある、遺跡・遺構だけでなく、砂質土からなる河川等の露頭面でも効果を発揮すると考える。

今後の開発と展望

種々の地質条件に対応するTOTとTOT-Vの2種類の薬剤の開発は、遺跡・遺構への適用のみならず、断層、地質露頭の展示保存などへの応用を広げた。遺跡・遺構以外の他の用途、たとえば地盤改良、住宅建材や、サンプル保存、芸術・工芸等への適応を試みているが、それぞれにおいて、強度増大、あるいは保存の効果が認められている。今後は、母材の性質に応じた、たとえば、含水量などに応じた、薬剤の設計が必要になると考える。また、コンクリートで固められた湖岸等から自然への回帰が検討されている、湖あるいは河川の湖岸等の流水系への使用など、応用は広がっていくと考える。

参考文献

- 1) 大井邦明：チャルチュアパ1997, エルサルパドル総合学術調査報告書, 京都外国語大学国際文化資料室発行, 1997.
- 2) 豊田昌宏・伊丹麻子・田中保士：土と石の強化保存材を用いた建設発生土のリサイクル新技術, 北陸地方建設技術報告会論文集, #1, pp. 45-48, 1998.
- 3) 豊田昌宏・深井亮太・田中保士：建設技術展2001近畿論文集, pp. 45-49, 2001.

発破を用いた実物大液状化実験 — 港湾・臨海部構造物の耐震性向上に向けて —

すが の たか ひろ
菅 野 高 弘
こ はま えい じ
小 濱 英 司*

1. はじめに

我が国は海に囲まれた島国であり、発展した都市の多くは臨海部に位置している。このため、平成7年兵庫県南部地震の際にそうであったように、港湾・臨海部は巨大地震

発生時において緊急復旧、復興支援のための人材や物資の流通拠点としての機能が求められ、その役割は非常に大きい。しかしながら、神戸港を中心とする多くの港湾が被災したことも事実である。

平成7年兵庫県南部地震は構造物に被害を与えただけで

表1 実験参加機関

機 関 名	実 験 内 容	摘 要
独立行政法人 港湾空港技術研究所 (PARI)	① 実験前と実験後の地盤動的特性調査 ② 鋼矢板、控え杭、タイロッド/ワイヤーおよび周辺地盤の地震時調査	実験総括・矢板構造物計測・結果解析
国土交通省 国土技術政策総合研究所 (NILIM)	① 管理型廃棄物護岸に用いる遮水シートの地震時、大変形時の特性評価 ② 地震前後の地盤の常時微動特性	実験結果解析
社団法人 日本埋立浚渫協会 (JDREA)	① 鋼矢板、控え杭、タイロッドおよび周辺地盤の地震時調査	施工管理・実験結果解析
鋼管杭協会 (JASSP)	① 鋼矢板、控え杭、タイロッドおよび周辺地盤の地震時調査	矢板構造物計測・結果解析
カリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD)	① 側方流動地盤中の群杭、埋設管の挙動把握	流動地盤と構造物の相互作用
深層混合処理工法研究会 (CDM Association)	① 深層混合処理地盤の地震時特性の把握	配合設計・施工管理・実験結果解析
カリフォルニア大学バークレイ校 (UCB)	① 深層混合処理地盤の地震時特性の把握	処理地盤計測・結果解析
地盤工学会 (JGS)	① 埋設管の液状化による浮き上がり挙動把握	埋設管の耐震性向上・解析
早稲田大学 (Waseda Univ.)	① 側方流動地盤の移動現象および単杭の挙動把握 ② 液状化地盤の弾性波調査 ③ 周辺家屋の振動調査 ④ 地中変位計測	音響トモグラフィ・光ファイバー地中変位計測・GPS等
浸透固化処理工法研究会 (PGM Association)	① 浸透固化処理工法の効果確認	施工管理・実験結果解析
東京大学地震研究所 (Tokyo Univ.)	① 動的3次元変位計測	動的GPS計測
中央大学 (Chuo Univ.)	① 液状化による水膜現象の把握 ② 地盤変状の把握	ボアホールカメラ計測・ラジコンヘリコプターによる空撮
独立行政法人 産業技術総合研究所 (AIST)	① 液状化地盤の地盤内密度分布把握	比抵抗法
独立行政法人 北海道開発土木研究所 (CERI)	① 液状化地盤の再液状化挙動の調査	実験結果解析

* (独)港湾空港技術研究所地盤・構造部構造振動研究室

なく、国民の社会生活・経済生活に大きな影響をもたらした。これを契機として、土木学会からは耐震設計に関してレベル1・レベル2地震動という極大地震動をも考慮した2段階設計に関する提言¹⁾がなされ、構造物の耐震設計に関する考え方が大きく変化した。しかし、構造物の耐震性に関する研究は進歩したが、その地震時挙動・耐震強化対策法が完全に確立したわけではない。その発生が逼迫しつつあると言われている東海・東南海・南海地震も海溝型の巨大地震であり、臨海部に甚大な被害を与えると想定されており、港湾・臨海部構造物の耐震性向上は急務の課題と言える。

地震時における地盤の強度・振動特性の変化は構造物の安定性に大きく影響することから、多くの研究機関が室内要素試験や模型実験による研究を行っている。しかし実際の構造物の挙動については、現在得られるデータの多くは地震後の被災調査の情報だけである。本来は、振動中の構造物挙動に関するデータが存在すれば最も良く、実際の構造物の地震時挙動を観測しようとする試みもある²⁾。しかし、いつ発生するかわからない地震の観測に多大な費用・労力をかけることは容易ではなく、そのため、実構造物の詳細な地震時挙動データがあまり得られていないのが現状である。そこで本研究では、発破振動によって地盤変状を誘導することにより、実物大規模の港湾・臨海部構造物の

挙動を明らかにすることを目的とした。本実験は、研究の趣旨に賛同した国内外産学官14機関の共同研究として実施した。ここでは、本実験の全体構成と実施内容を述べる。

2. 実験の概要および実施組織

2.1 全体の概要

発破本実験は、平成13年11月13日に北海道広尾郡広尾町の十勝港の第四埠頭埋立地で行った。実験準備施工は平成13年8月頃より開始し、12月の第二回発破およびその後の撤去工に至るまで、全体で約5カ月の期間を要した。

地震による構造物被害の要因として、主に地震動による振動に起因する場合と地盤の変状に起因する場合が挙げられるが、本研究では特に後者について着目した。すなわち、実験ヤード内に爆薬を平面的に配置し、時間差で点火することによって模擬地震動を発生させ、液状化現象やそれに伴う側方流動を起こすこととした。このときヤード内には種々の構造物を設置しておき、その挙動を観測した。

本研究に参加した共同研究機関を表1に示す。各機関の構造物および計測は図1、写真1、2に示すように配置された。実験ヤードは、大まかには、発破実験時に液状化による側方流動を発生させる非耐震岸壁側(図中下側、設計水平震度 $k_h=0.0$)と耐震岸壁側(図中上側、 $k_h=0.15$)に分

主な計測位置図

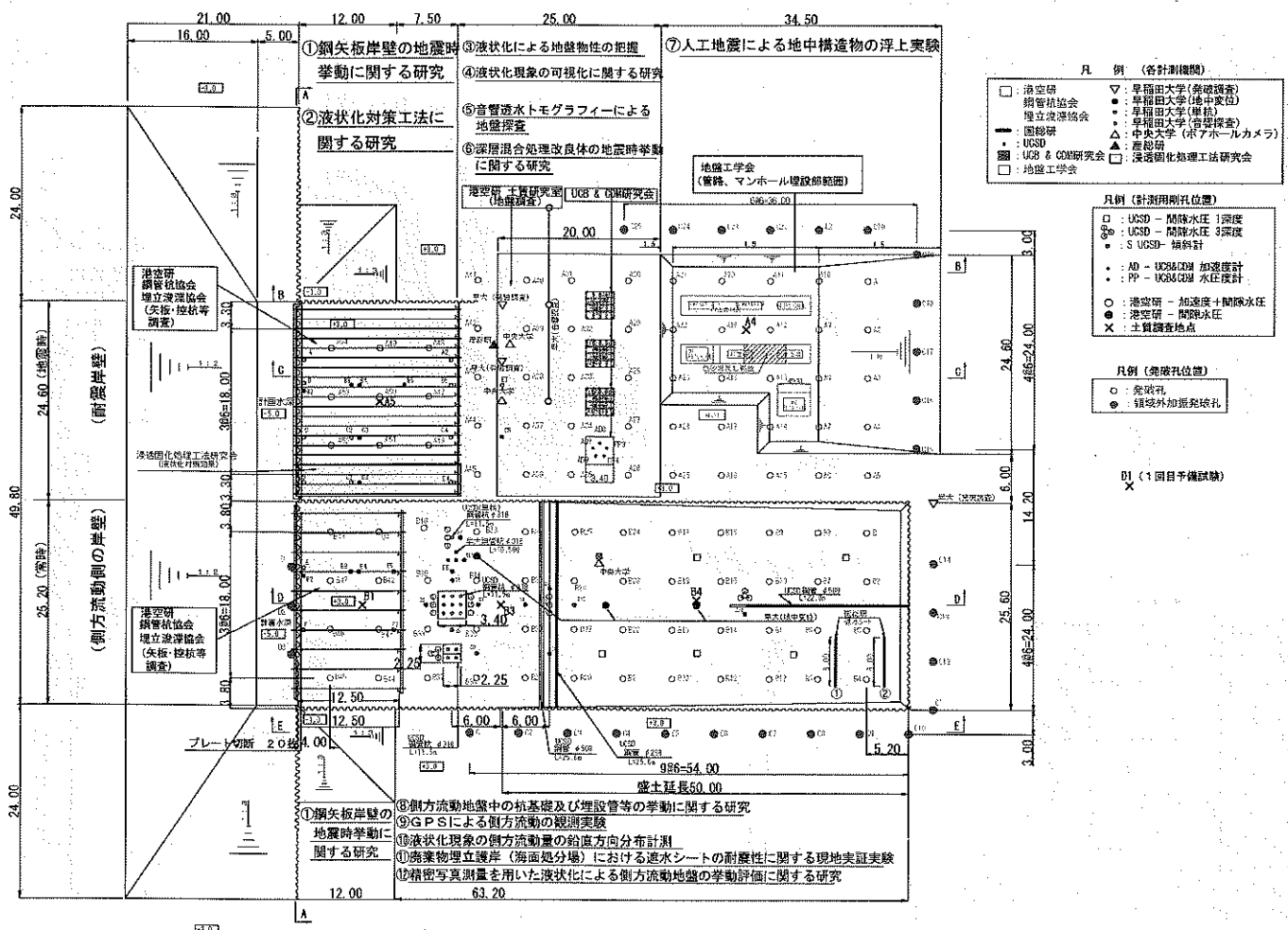


図1 構造物・計測機器の配置



写真1 実験ヤード全景 (側方より)



写真2 実験ヤード全景 (上空より)

けられる。岸壁はともに法線延長 25 m の設計水深 -5.5 m の控え直杭式の鋼矢板岸壁である。非耐震岸壁側の背後地盤では液状化による側方流動の発生を期待しており、Ishihara et al. の研究⁹⁾ を参考に護岸壁移動の背後地盤への影響範囲を考慮して、岸壁背後方向への発破領域の大きさを決定した。また非耐震岸壁側の側方流動を促すため、背後地盤は 4% の緩傾斜盛土 (勾配) とし、さらに、発破振動終了後に鋼矢板岸壁のタイロッドを成形爆薬によって切断した。ここに杭基礎やパイプラインなどの模型が埋設され、地盤の側方流動時における挙動を検討した。

2.2 地盤条件および発破工の概要

実験ヤードとなった十勝港第四埠頭は、実験の約 1 年 6 カ月前 (平成 12 年 6 月) に埋め立てが完了している。側方流動側では図 2 のような地盤構成となっており、もともとの海底の原地盤は N 値 50 以上の礫まじりの砂層であるが、その上の埋立層は N 値が 5 以下の砂層やシルト層となっている。この埋立地盤は浚渫砂のポンプ圧送によって施工されており、粒経加積曲線 (図 3) は港湾で使用している液状化判定⁴⁾ の「液状化の可能性あり」のほぼ範囲内にある。

地盤中の爆薬の配置は、現地で行った 2 回の予備発破実験結果に基づいて決定した。予備実験結果では、現地土質条件においてはエマルジョン爆薬の影響範囲が 3 m 程度であることが明らかとなり、これに基づいて約 6 m のグリッド配置を決定した。また深度方向には、埋立土の下層 4 kg、中層 3 kg の装薬量で二段を標準としたが、構造物埋設箇所ではセンサーや構造物本体にダメージを与えないように薬量を減らした部分もある。ヤード内に配置したエマルジョン爆薬の総量は約 840 kg となった。点火方法は、地電流等による誤爆を防止するために導火線を用いた。まず構造物設置領域内において、遅延雷管によって各発破孔の下段から上段は 200 ms 間隔、各孔間は 500 ms 間隔として、岸壁背後から岸壁に向かって蛇行するように連続的に発破を行った。その後、構造物設置領域の外周を 500 ms の秒時差で発破した。これにより、全体で 127 孔を約 60 s で発破

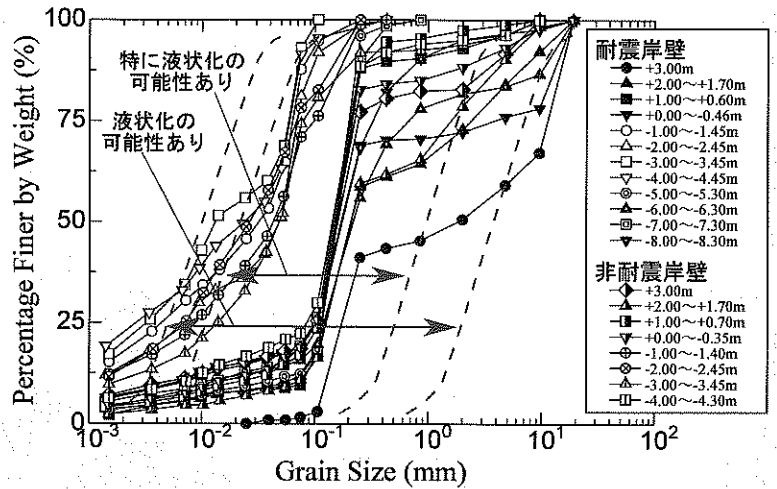


図3 粒径加積曲線

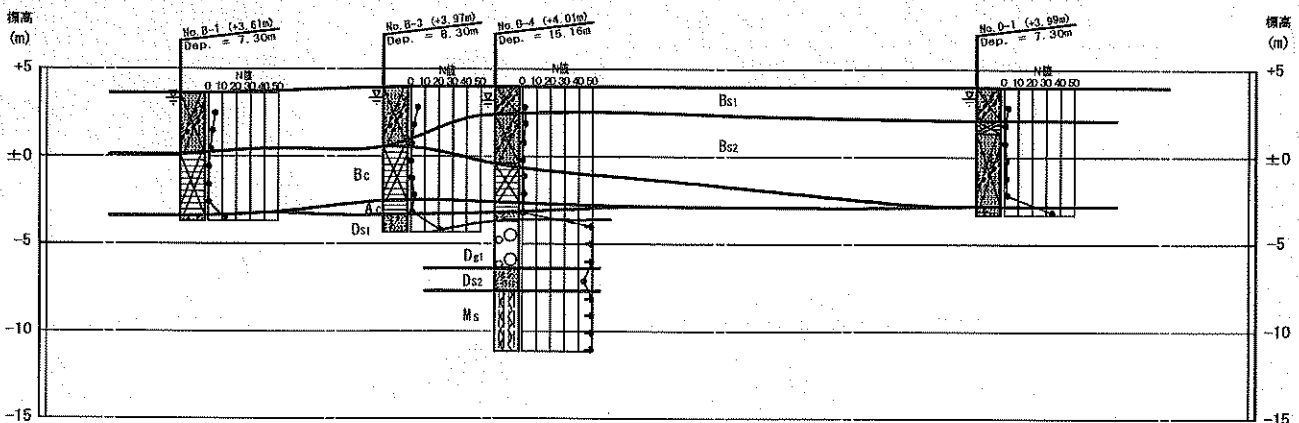


図2 土質想定図



写真3 発破実験中の様子, 手前は見学者

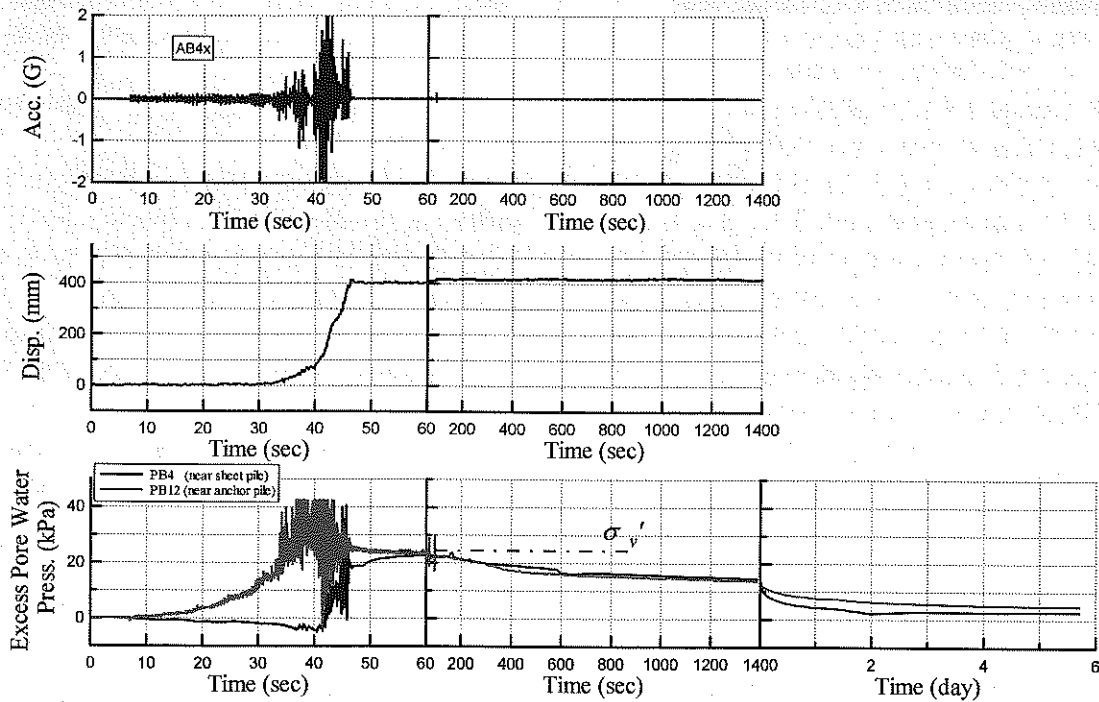


図4 発破振動中および発破終了後における加速度, 鋼矢板上端変位, 間隙水圧の時刻歴 (耐震岸壁側)

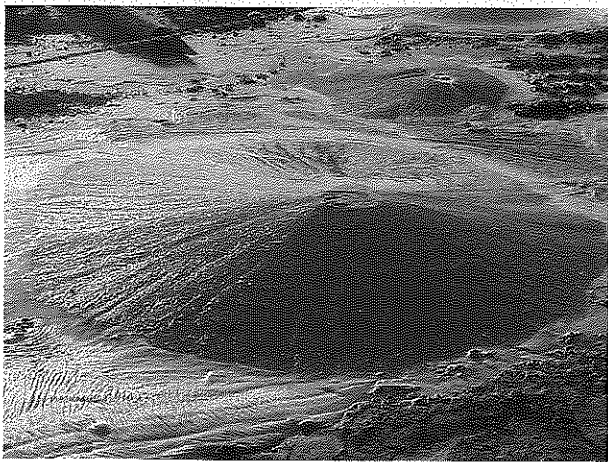


写真4 発破領域内で見られた噴砂 (発破後)

平海陸方向成分), 鋼矢板上端変位, 地表面から深さ 5.5 m の間隙水圧記録を示す。最大加速度は, 2G(重力加速度の 2 倍) を超え, 場所によっては 10G を程度の箇所もあり, 近傍での発破が非常に大きな衝撃力を示すものであった。このとき過剰間隙水圧は発破振動継続中にほぼ有効上載圧に達しており, 地盤が液状化に至ったことは明らかである。実際, 発破終了の数分後からは発破領域内のいたる所で液状化による噴砂現象が見られており (写真 4), 発破による間隙水圧上昇と地震時の繰返しせん断によるものとはメカニズムが異なると考えられるが, 地盤内の過剰間隙水圧が発生して軟弱化する現象としては同様であると考えられる。また図 4 に見られるように, 過剰間隙水圧が完全に消散するのに数日間を要した。

以下では, 各研究機関の個別の研究目的および内容について紹介する。

(1) 矢板岸壁の地震時特性

矢板岸壁の地震時特性については, 矢板と地盤・タイロッド・控杭と地盤の動的相互作用となることから, 非常に複雑な安定機構となっている。ここでは, 港湾空港技術研

終了した (写真 3)。

2.3 実験結果の概要および各機関の研究内容

図 4 には耐震岸壁側の矢板背後地盤の地表面加速度 (水

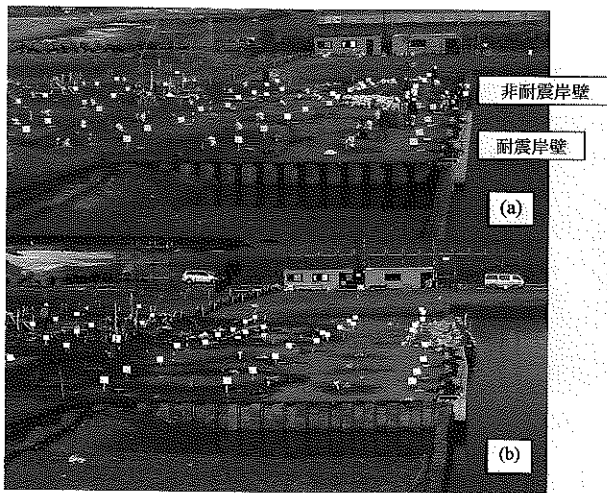


写真5 発破前後の鋼矢板岸壁の様子
(a)実験前、(b)実験後

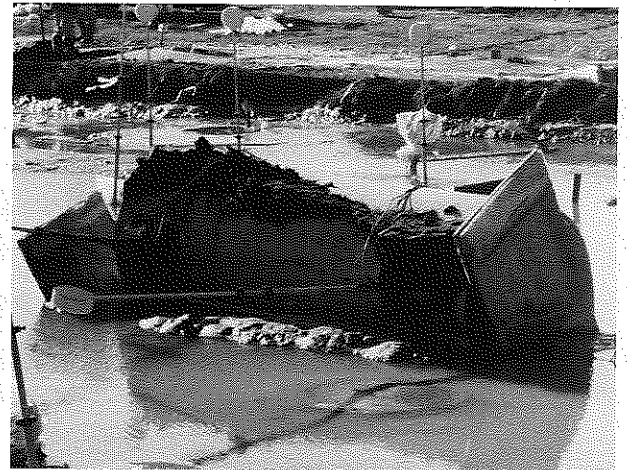


写真6 地中埋設管の浮き上がり(発破後)

研究所・(社)埋立浚渫協会・鋼管杭協会の3機関が協力し、地震時挙動把握・数値解析検討・新しい耐震設計体系構築のため基礎データを得ることを目的として本実験を実施した⁹⁾。前述のように、鋼矢板岸壁は計画水深5.5mとし、非耐震岸壁(設計水平震度 $k_h=0.0$)と耐震岸壁($k_h=0.15$)の比較検討を行った。矢板のひずみ計測は、矢板の打設前から開始し、打設・前面掘削等に伴うひずみ発生から振動中の動的計測までを実施した。鋼矢板は発破振動中に大きく変位し(写真3, 写真5)、耐震・非耐震岸壁の挙動が比較された。

(2) 液状化対策工法に関する研究

液状化対策工法には種々の工法があるが、本実験では2工法について実験を実施している。

CDM工法については耐震岸壁側の矢板控杭背後において4種の異なった改良を施し、地震時挙動を計測した。断面は表層から完全に着底した改良(7m改良)、5m改良、3m改良から未改良までである。また、地表面に構造物を模した土槽(接地圧 0.25 kg/cm^2)を施工している。本実験は、カリフォルニア大学パークレイ校と深層混合処理工法研究会が共同で実施した。

また、既存構造物近傍に施工する液状化対策工法としてゲルタイムの長い薬液を注入する「浸透固化処理工法」を耐震岸壁側の矢板背後に施工して、その液状化対策効果を計測した⁹⁾。本実験は、浸透固化処理工法研究会が実施した。

(3) 地中構造物の浮上実験

1964年新潟地震や1993年釧路沖地震などではマンホールが浮上する被害が発生した。また、他の過去の地震においても、軽量の地中構造物が浮上することが観測されている。このため、効果的な浮上対策工法を検討している地盤工学会の「液状化による地中埋設構造物の浮き上がり被害に関する研究委員会」が、埋戻し土が緩い場合と密な場合、各種対策を施した構造の8種類の埋設構造物を耐震岸壁側に施工し、計測した⁷⁾。埋戻し土が緩い場合は発破終了後に浮上しており(写真6)、対策済み断面との違いが確認された。

(4) 基礎杭・地中埋設管への側方流動の影響に関する研究

地盤の側方流動時における地中線状構造物の挙動観測を目的とした検討がカリフォルニア大学サンディエゴ校・早稲田大学の共同で行われた。非耐震岸壁側の控え杭背後に、ひずみゲージを敷設した9本・4本の群杭および単杭(ともに杭長11.5m, 直径300mm)、地盤の側方流動に直行方向のガス管(直径500mm)および電気配管(直径200mm)、側方流動方向のガス管が埋設された⁹⁾。

(5) 再液状化地盤の側方流動に関する研究

一度液状化した地盤が再度液状化する現象は、過去の地震において報告されている。北海道開発土木研究所・カリフォルニア大学サンディエゴ校・港湾空港技術研究所の3機関は再液状化現象に着目し、平成13年12月14日に規模を縮小した発破による実験を実施した。計測は群杭基礎部分において再液状化による杭への作用外力を測定した。

(6) 液状化地盤の側方流動に関する研究

側方流動発生時の経時変化を計測するために非耐震岸壁側の地表にGPS計測装置を11台配置し1秒間隔でその位置情報を計測した。また、地中の変状を計測するために光ファイバーを塩ビ板に取り付け、鉛直に埋設した。本実験は早稲田大学が中心となって実施された。

(7) 廃棄物埋立護岸(海面処分場)における遮水シートの耐震性に関する研究

非耐震岸壁の上流側に、重力式護岸の裏込石を模した部分に計測装置を設置した遮水シートを施工し、側方流動によって大変形した際の健全性を評価するための実験を行った⁹⁾。この検討は、国土総合技術政策総合研究所(横須賀)が実施した。

(8) 精密写真計測

ラジオコントロールヘリコプターや高所作業車からの写真計測による実験前後の変状を、コンピュータ処理によって数値化する手法を検討した¹⁰⁾。これは、中央大学の研究グループが中心となって実施され、図5に示すような発破終了19時間後における非耐震岸壁側の地盤変状を計測した。これらのデータは別途実施された測量結果・GPS計測結果と比較検討された。

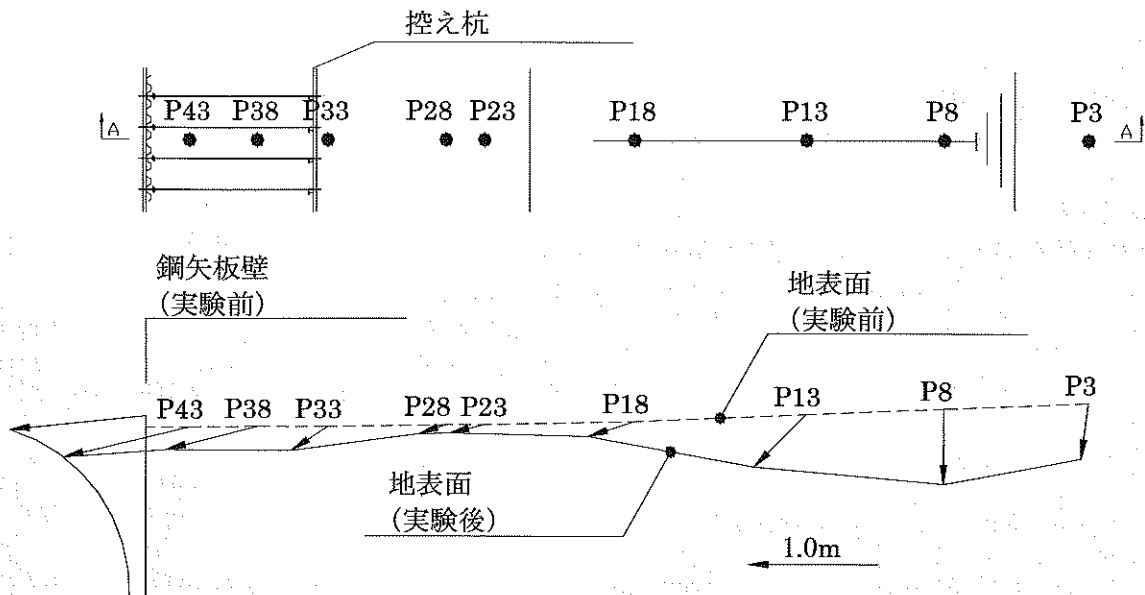


図5 側方流動による地盤の変形 (非耐震岸壁側)

(9) 動的 GPS 計測

近年の GPS 計測技術の向上は目覚ましいものがあり、早稲田大学が実施した計測以外に、カリフォルニア大学サンディエゴ校が 10 Hz の動的計測結果 (杭頭や、各種構造物・地表に GPS 計測装置および伝送装置を配置) を無線で計測小屋へ伝送する実験を実施した。

同様に、10 Hz の動的 GPS 装置を用いた計測を東京大学地震研究所と港湾空港技術研究所が共同で実施した¹¹⁾。メモリーカードに蓄積された計測データはトータルステーションによる計測結果と比較され、十分な精度を有することが確認された。

(10) 液状化前後・液状化中の地盤の状況を把握する研究

地盤の間隙比・透水係数などを計測できる音響透水トモグラフィーによる物理探査手法 (耐震岸壁側) が早稲田大学を中心とするグループによって実施された。同様に比抵抗計測法を用いた液状化現象の可視化の試みを、産業技術総合研究所が実施した。

(11) 埋地地盤の地盤特性把握に関する研究

標準貫入試験・電気式コーン貫入試験・RI コーン試験・ダイラトメータ試験・サイズミックコーン試験・自動スエーデン試験などが、実験前・実験直後・実験から 7 月後に実施され、埋地地盤の発破実験前後や長時間経過後の特性把握が行われた¹²⁾。本計測は港湾空港技術研究所が実施した。

(12) 無線計測技術開発

港湾空港技術研究所とカリフォルニア大学バークレイ校が共同で実施した、ワイヤレスデジタルデータ送信技術を用いた無線加速度計測は、従来型の加速度センサーと同じ場所に設置された。

コンピュータ通信を用いて計測小屋で観測された計測データは、従来型センサーによる計測結果と良い一致を示した。本実験では、14 機関が設置したセンサーは合計で約 800 ch であり、そのケーブル延長は約 40 km であった。これら

計測機器の設置は構造物の施工工事と同時に進められ、作業安全管理とともに現場の工程管理は非常に複雑なものとなった。したがって、今後の現場でのこの種の観測に際して、実務的には、このような無線計測技術は重要になると考えられる。

3. おわりに

耐震工学研究の柱としては、被災調査、数値解析、模型実験や室内試験が挙げられる。近年は強震観測機器が多数配置されつつあり、地震中の加速度や速度の記録が多く録れるようになったが、実際の構造物挙動である応力やひずみ、変位などのデータはあまり得られていない。本研究ではこれらの取り組みで不足している地盤・構造物の液状化時の挙動を最先端の計測技術を用いて計測し、耐震関係の研究へ反映させることとした。この研究結果については、「港湾・臨海部都市機能の耐震性向上に関するシンポジウム—土構造物および抗土圧構造物の地盤挙動および安定性—」を港湾空港技術研究所と地盤工学会とで共催し¹³⁾、実験状況の映像や結果報告等の DVD-ROM¹⁴⁾ への取りまとめも行った。研究成果の詳細については、これらを参照されたい。

本プロジェクトは、港湾・臨海部都市機能の耐震性向上に関心のある国内外の産学官 14 機関の共同研究として、十勝港において大型工事と計測工事を同時に実施するといった、他に例を見ないプロジェクトであった。港湾空港技術研究所などの公的研究所が実験サイトの事業者や関係機関との調整を行い、現場の工程・施工管理等は民間研究機関が主体となり、また、大学等はその独自のアイデアを持ち込むことによって、プロジェクト全体を潤滑に進めることができた。このような大プロジェクトはなかなか行えるものではないが、産学官が集まり、それぞれの立場・特徴を活かすことができれば、今後も不可能ではないと考えられる。

謝辞

本プロジェクトの実施に当たっては、実験サイトの照会や現地との調整等で北海道開発局の支援を受けた。実験ヤードの管理者である広尾町には、土地利用承諾をはじめ関係機関との調整、住民の方々への周知等でお世話になった。共同研究機関の多大な協力によって約500名の見学者を迎えた実大実験を無事故で終了することができた。本プロジェクトに関係した各位に、ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土木学会耐震基準等基本問題検討会議：土木構造物の耐震設計法等に関する第2次提言，土木学会誌，Vol. 81，1996.
- 2) 笹島隆彦・梅沢信敏・三浦均也・大塚夏彦・菅野高弘：実大重力式岸壁の地震時挙動計測，土木学会，海洋開発論文集，Vol. 18，pp. 611-616，2002.
- 3) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H.: Soil characteristics and ground damage, special issue of soils and foundations, pp 109-118, 1996.
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp. 281-282，1999.4.
- 5) Kohama, E., Sugano, T., Shiozaki, Y. and Mitoh, M.: Dynamic Behavior of a Steel Sheet Pile Quay Wall in the Full-Scale Experiment with Regard to Liquefaction, 13th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE, VANCOUVER, No. 3485, 2004.8. (CD-ROM)
- 6) Kawamura, K., Yamazaki, H., Sugano, T. and Hayashi, K.: Proof Experiment Using Artificial Earthquake Concerning Effect of Permeable Grouting Method as Measures Against Liquefaction, 13th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE, VANCOUVER, No. 38, 2004.8. (CD-ROM)
- 7) 中瀬 仁：発破による人工液状化サイトにおける地中構造物の実物大浮上実験，第37回地盤工学研究発表会概要集，地盤工学会，pp. 1763-1764，2002.7.
- 8) Juirnarongrit, T. and Ashford, S.A.: Analyses of Pile Responses Based on Results from Fullscale Lateral Spreading Test: Tokachi Blast Experiment, 13th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE, VANCOUVER, No. 1642, 2004.8. (CD-ROM)
- 9) 長尾 毅・近藤三樹郎・宮田正史・西守男雄・菅野高弘：海面処分場における遮水シートの耐震性に関する現地実証試験（その1），第37回地盤工学研究発表会概要集，地盤工学会，pp. 1941-1942，2002.7.
- 10) 阿保寿郎・三輪 滋・中原博隆・筒井雅行・菅野高弘・小濱英司・園生剛治：ラジコンヘリを用いた精密写真測量による液状化に伴う地盤の流動量の評価，第11回日本地震工学シンポジウム，166，pp. 875-880，2002.11.
- 11) 小国健二・堀 宗朗・望月一浩・菅野高弘：RTK-GPSを用いた地盤大変状のリアルタイム計測に関する基礎的研究，第11回日本地震工学シンポジウム，366，pp. 1987-1990，2002.11.
- 12) 谷 俊博・田中政典・渡部要一・水野健太・伊藤康成：原位置試験による液状化前後の地盤調査について，第37回地盤工学研究発表会概要集，地盤工学会，pp. 125-126，2002.7.
- 13) 地盤工学会 抗土圧構造物における地盤挙動と安定性に関する研究委員会：港湾・臨海部都市機能の耐震性向上に関するシンポジウム—土構造物および抗土圧構造物の地盤挙動および安定性—，2003.12.
- 14) 港湾空港技術研究所：港湾・臨海部都市機能の耐震性向上に関する実物大実験，DVD-ROM，2003.12.