

地震と津波

産業技術総合研究所では、地層や地形に残された巨大地震の痕跡を調べ、将来の地震予測や防災・減災に役立てようとしています。

日本周辺で起こる地震は大まかに「海溝型地震」と「内陸型地震」の二つに分けられます。「海溝型地震」は時として津波も伴うことが特徴で、私たちは津波の痕跡から過去の地震像の解明に取り組んでいます。

巨大地震・津波を予測する

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震（この地震による災害を総称して「東日本大震災」と呼ばれています）は、1000年に1回の超巨大地震と言われました。このように長い再来間隔で発生する地震は、どのように予測すればよいのでしょうか。研究者は「ある場所で大きな地震が起こったら、将来も似たような地震が起こるだろう」と考えます。この考えに基づき、過去にどのような地震が繰り返していたかを詳しく調べることにより、将来の発生確率を導き出していきます。産業技術総合研究所では、地層や地形に残された巨大地震・津波の痕跡を見つけ出し、将来の地震の予測を信頼性の高いものにしていくことを目指しています。

過去の津波の証拠 — 津波堆積物 —

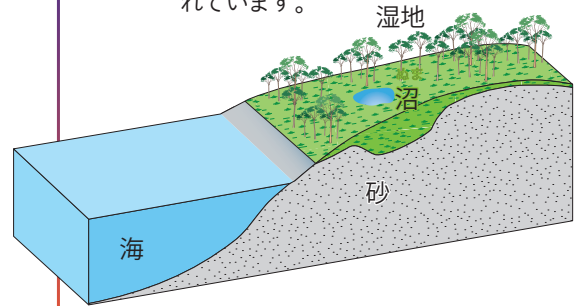
海で大きな地震が発生すると、津波が起こることがあります。巨大な津波は、海底や海岸にたまった土砂を削り取って運びます。運ばれた土砂は「津波堆積物」として陸上に残されます。津波堆積物は、津波による浸水や土砂堆積の直接的な証拠であるため、その年代を調べることにより、津波の発生時期を知ることができます。

日本における津波堆積物の研究は1960年頃から始まり、産業技術総合研究所はこの分野をリードする組織の一つとして調査を行っています。

津波堆積物が残される様子

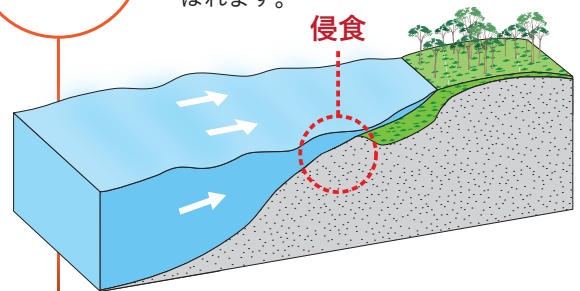
津波が起こる前

砂浜の背後には湿地や沼が広がっています。こうした場所では、植物がたまった地層（泥炭、地方によっては「すくも」「サルケ」と呼ぶ）が堆積します。このような場所の多くは埋め立てられ、水田や宅地として利用されています。



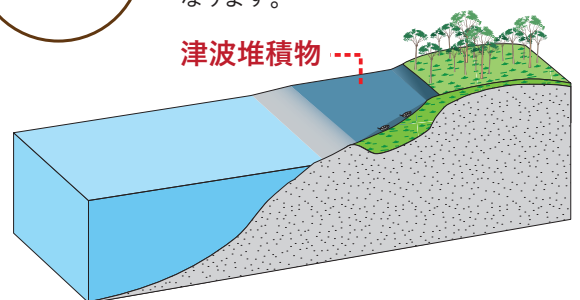
津波の発生

津波により、海底や海岸の土砂が削り取られ、湿地や沼だった場所に運ばれます。



津波が起こった後

津波が引いた後、運ばれた土砂などがそのまま残されて「津波堆積物」となります。



この頁の図は、GSJ研究資料集 no.612をもとに作成

過去に発生した津波の痕跡を調査する

産業技術総合研究所では、地層中に残された津波堆積物を調べるため、これまで数千地点以上の場所で掘削調査を行ってきました。採取した試料の一部は研究所に持ち帰り、様々な分析を行って、過去にどのような津波が発生したのかを考えます。

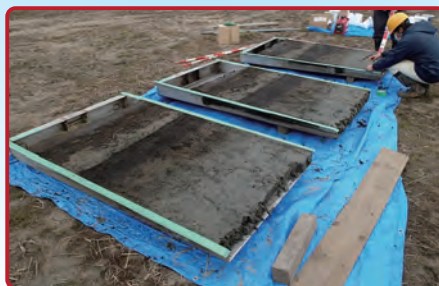
産業技術総合研究所による津波堆積物の調査

調査地域の一例

調査年	調査地域
2003年～2019年	北海道厚岸町
2003年～2021年	北海道浜中町
2020年	北海道大樹町
2017年～2020年	北海道白糠町
2011年～2013年	青森県東通村
2004年～2013年	宮城県仙台平野周辺
2008年～2010年	福島県南相馬市
2009年～2010年	茨城県日立市
2013年～2018年	千葉県九十九里浜周辺
2010年～2012年	静岡県沼津市
2018年～2019年	三重県南伊勢町
2013年、2021年	高知県南国市



2015年2月 北海道厚岸町におけるジオスライサー調査。
(写真撮影・提供 篠崎鉄哉)



2013年3月 宮城県仙台市におけるジオスライサー調査。(澤井, 2014 GJSJ地質ニュースより)



2012年10月 茨城県北茨城市におけるジオスライサー調査。

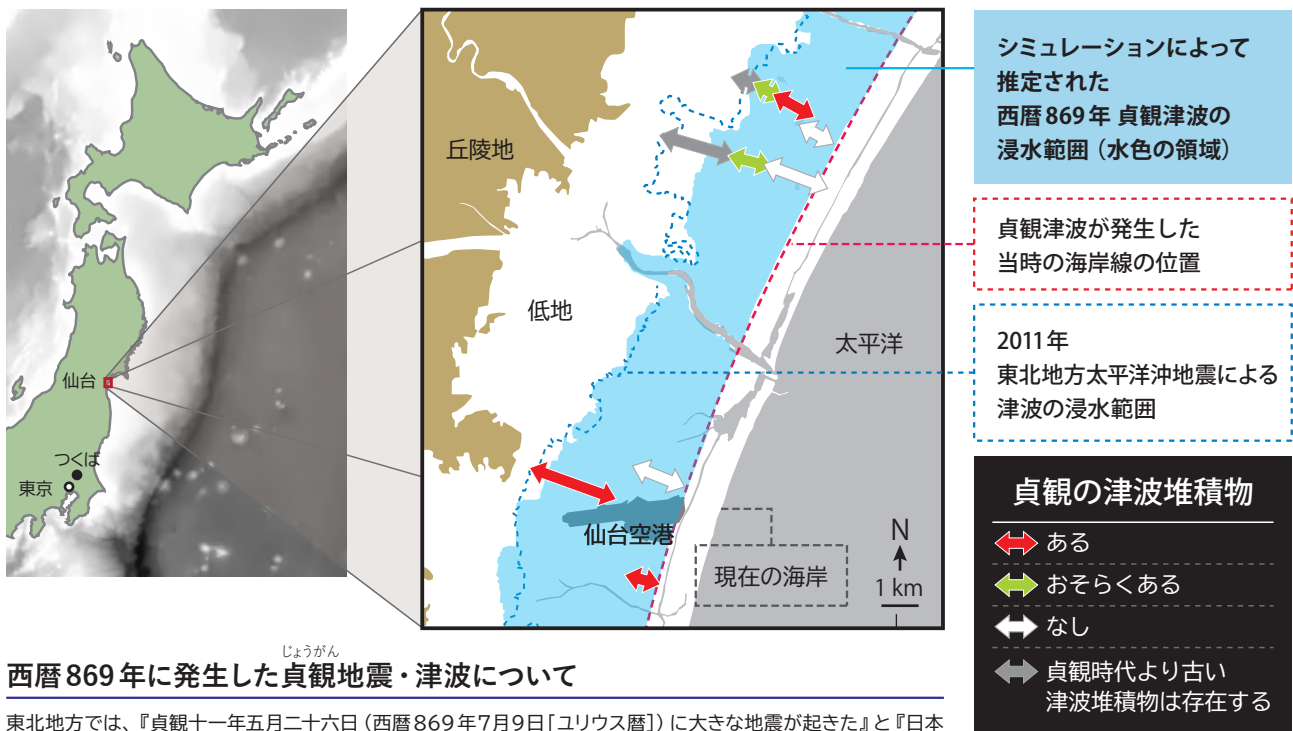
過去の巨大津波を復元する

津波堆積物からわかることは、津波の発生時期だけではありません。例えば仙台平野では、広範囲にわたって沿岸の水田1枚1枚の地層を丹念に調べ、西暦869年に発生した巨大津波（通称、貞観津波）の大まかな浸水範囲を明らかにすることができました（図1）。

この調査結果を踏まえて、コンピュータ上で地震と津波を発生させ、どのような地震であれば図1の津波堆積物の分布を再現できるかということ考えました（図2）。いろいろなタイプの地震を発生させ、

シミュレーションを繰り返した結果、長さ200km、幅100kmの断層が7mすべったときの津波が堆積物の分布をよく再現できることがわかりました。これを地震の規模を表すモーメントマグニチュード（Mw）に換算すると約8.4になります。この結果は、震災前の2010年6月に報告書として政府に提出されていました。実は、2011年の震災前には、宮城県沖ではM7規模の地震しか想定されていませんでした。地質の証拠とシミュレーションによって、想定外の巨大地震を復元できたのです。

図1 津波浸水シミュレーションの例



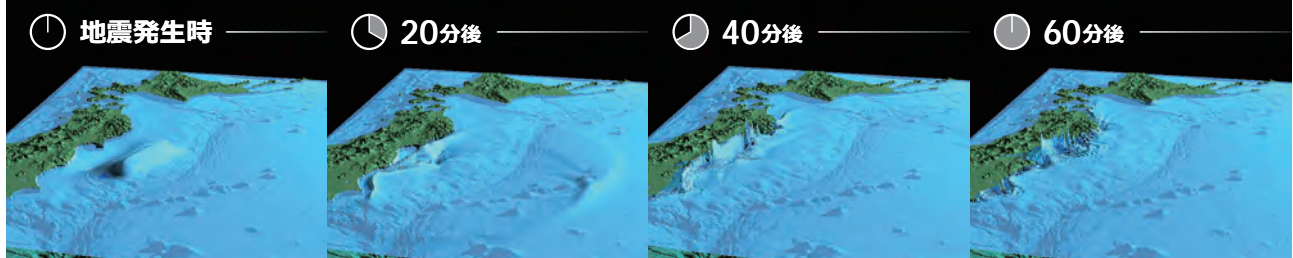
西暦869年に発生した貞観地震・津波について

東北地方では、『貞観十一年五月二十六日（西暦869年7月9日[ユリウス暦]）に大きな地震が起きた』と『日本三代実録』という歴史書に書かれています。『日本三代実録』は、西暦858年～887年の30年間を扱う歴史書で、864年の富士山の貞観大噴火、同年の阿蘇山噴火、869年の貞観地震の記録などがあります。

産業技術総合研究所の掘削調査でも、西暦869年の貞観地震・津波による津波堆積物が見つかり、歴史書を裏付けるものとなりました。

GSJ研究資料集 no.630より浸水域や津波堆積物の位置等のデータは、Sawai et al. (2012, Geophysical Research Letters) による。

図2 コンピュータによる津波の再現



津波シミュレーションのスナップショット 地震発生時から20分後、40分後、60分後の様子

活断層・古地震研究報告 (no.10) の表紙より

地層の掘削

津波堆積物の研究のためには、なるべく良い状態で堆積物を採取し、観察・分析する必要があります。このため、調査をする土地の状況によって様々な道具を使い分けて掘削します。分析に多くの試料が必要な場合は、大きな機械を使用して採取することもあります。また、掘削調査と併せて、地中レーダー探査や航空測量を行うこともあります。

地層の掘削方法一覧

手法	特徴	掘削のサイズ 掘削作業に必要な面積	所要時間	
手掘り式	ハンドコアラー	最も簡単な掘削方法で、1～2名での掘削が可能。重機は使用しない。	直径3～6cmの穴×深さ5m程度 掘削作業に必要な面積 1.5m×1.5m	1地点につき 30分～ 1時間30分程度
	ロシアンサンプラー	比較的簡単な掘削方法で、1～2名での掘削が可能。重機は使用しない。	直径5cm程度の穴×深さ5～10m程度 掘削作業に必要な面積 1.5m×1.5m	1地点につき 30分～ 1時間30分程度
	塩ビパイプの押し込みによる採取	水深の浅い湖や池で、水上に浮かべたフローターや結氷した氷の上から、塩ビパイプを突き刺して試料を採取する方法。	直径10cm程度の穴×湖底から深さ1m程度 掘削作業に必要な面積 1.5m×1.5m	1地点につき 30分～ 1時間程度
	シンウォールサンプラー	円筒型の試料が採取できる。4～5名程度での掘削が可能。重機は使用しないが、試料を引き抜くために三脚を組む必要がある。	直径7cm程度の穴×深さ5～6m程度 掘削作業に必要な面積 3m×3m	1地点につき 5時間程度
* ジオスライサー（地層抜き取り装置）	ハンディジオスライサー	地層を箱型に抜き取る方法。小型のバイブレーターを使用しながら、人力で採取する。試料を引き抜くために三脚を組む必要がある。サンプルボックスを打ち込む際、ハンマー（ショックレスハンマー、かけや等）を使用することもある。	7cm×15cm×深さ1～3m程度の箱型の穴 深さは最大で3m程度 掘削作業に必要な面積 3m×3m	1地点につき 30分～ 1時間30分程度
	ジオスライサー（大型ロングタイプ）	地層を箱型に抜き取る方法。クローラークレーン、ラフターレーンクレーン、小型クローラークレーンなどの移動式クレーンを使用する。	15cm×40cm×深さ4～6m程度の箱型の穴 場合によっては、工事用の矢板を使用してさらに深く掘削することもある。 掘削作業に必要な面積は、使用するクレーンなどによって異なる。	1地点につき 1時間程度（深さ4mの場合） 準備および撤収作業は、重機を使用するため1時間以上の時間がかかることもある。
	ジオスライサー（大型幅広タイプ）	地層を箱型に抜き取る方法。クローラークレーンなどの移動式クレーンを使用する。	15cm×100cm×深さ2m程度の箱型の穴 掘削作業に必要な面積は、使用するクレーンなどによって異なる。	1地点につき 1時間程度 準備および撤収作業は、重機を使用するため1時間以上の時間がかかることもある。
機械ボーリング	ボーリング用の機械（試錐機 しすいき）を使用した掘削調査。円筒型の試料を採取することができ、深さは数十メートル以上に達する。打込式やロータリー式などがあり、状況によって採取方法を変える。	最大で直径10～15cm程度の穴×深さ5m程度までは打込式、それより深いところはロータリー式で採取することが多い。 ボーリング機械を立てるための櫓を設置するため、掘削作業に必要な面積は、比較的大きく、10m×10m程度	1地点につき 数日	
トレンチ・ピット調査	大きな溝を掘って、その壁面の地層を観察する調査。「トレンチ」とは溝の意味。比較的小規模な溝を「ピット」と呼ぶ。溝の掘削は重機を使用するが、ピットは人力で掘削することもある。	掘削する溝の大きさ、使用するパワーショベル（油圧ショベル）によって異なる。	1地点につき 1日～数日	

*「ジオスライサー」は復建調査設計株式会社の登録商標です。
地層抜き取り装置と言うこともありますが、ほとんどの場合はジオスライサーと呼びます。



地層の掘削方法

手掘り式

手掘り式の掘削は、少人数の人力で行うため、周囲の環境に与える影響を小さく抑えることができます。また、短時間で行うことができるため、農作業などへの影響も最小限に抑えられます。

地質の特性に応じて刃先を使い分けることにより、深さ10m程度まで掘削することができます。

手掘り式 ハンドコアラー

ハンドコアラーを使用した掘削は最も簡単な調査方法で、1～2名で運用することが可能です。長さ1mの金属の継ぎ柄を足しながら、少しずつ深く掘り進めていきます。土質によって先端部を付け替えることにより、泥層や砂礫層など様々な堆積物に利用することができます。この一方で、採取できる量が非常に少なく、また乱された状態で試料が採れることも多いため、分析用試料の採取には向いていません。このため、ハンドコアラーで調査した場所を別の方法で再掘削して、分析用試料を確保することがあります。

ハンドコアラーによる掘削作業が終了した後、現場に継ぎ柄を残すことはありません。作業後は、掘削した穴を埋め戻します。

掘削のサイズ 直径3～6cmの穴×深さ5m程度

掘削作業に必要な面積 1.5m×1.5m程度

所要時間 1地点につき30分～1時間30分程度

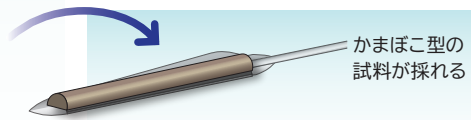
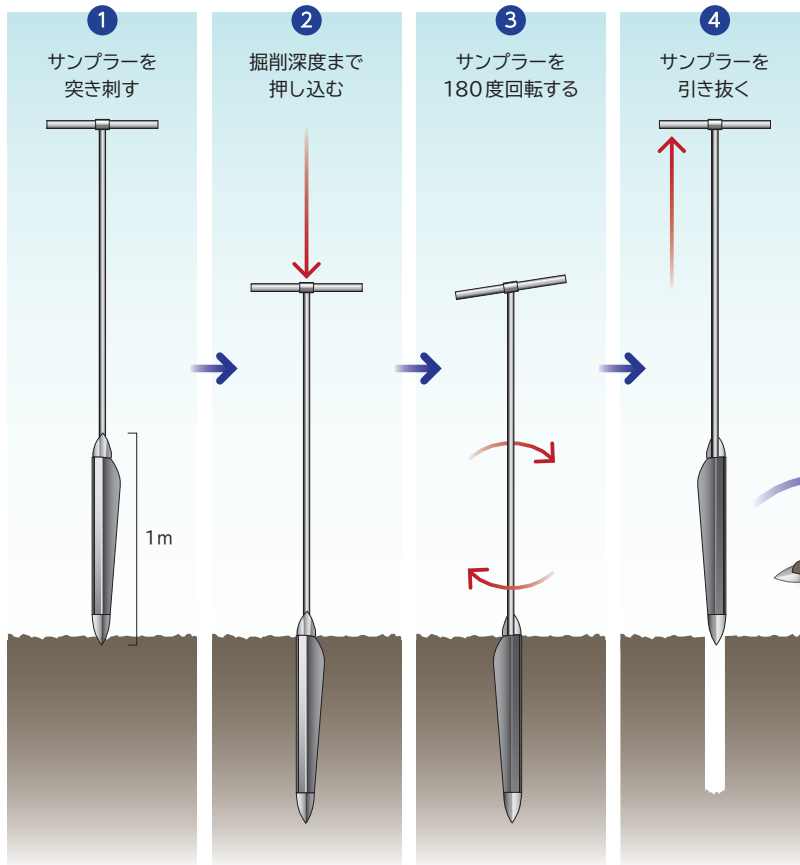


ハンドコアラーを使用した掘削調査。(2015年5月 北海道厚岸町) (写真撮影・提供 谷川晃一郎)



ハンドコアラーで使用する様々な先端部とハンドル部分。左から ①砂を掘るための先端部(このタイプは特に「ハンドオーガー」と呼ぶ) ②口径6cmのコアラー(長さ50cm) ③口径3cmのコアラー(長さ1m) ④ハンドル

ハンドコアラー・ロシアンサンプラー※1による掘削方法



かまぼこ型の試料が採れる

作業はすべて人力で行う。先端部の形状により、ハンドコアラーあるいはロシアンサンプラーと呼ぶが、原理や採取できる試料の量は変わらない。

※1 ロシアンサンプラーは、ハンドコアラーと同様に1～2名で運用することが可能なサンプラーです。詳細は次項を参照してください。

手掘り式

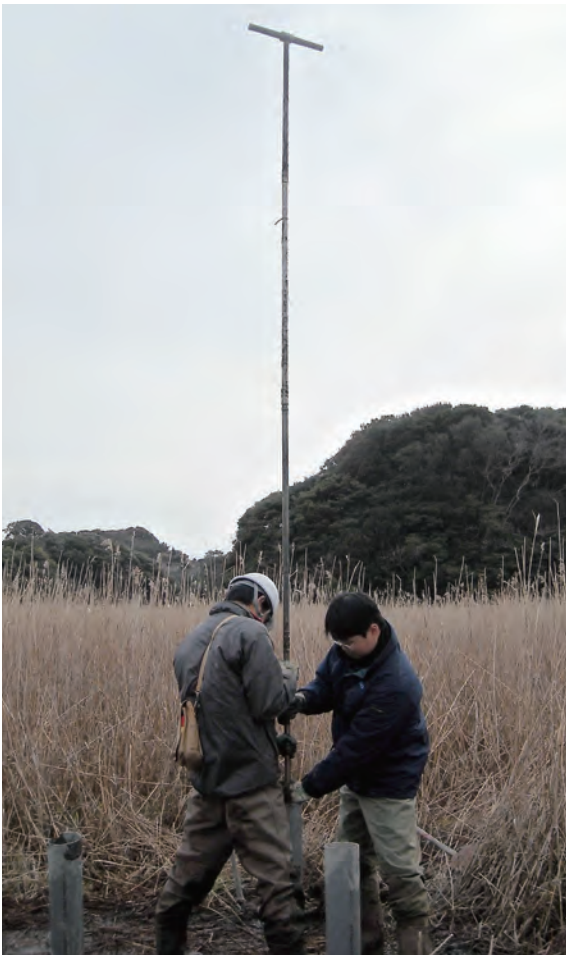
ロシアンサンプラー

ロシアンサンプラーは、ハンドコアラーと同様に1～2名で運用することが可能なサンプラーです。不攪乱試料を採取することができるため、分析用試料を採取するのに向いています。ただし、先端部が繊細なため、柔らかい堆積物（泥や泥炭）しか採取することができないというデメリットもあります。

掘削のサイズ 直径 5 cm 程度の穴 × 深さ 5 ～ 10m 程度

掘削作業に必要な面積 1.5m × 1.5m 程度

所要時間 1地点につき 30分 ～ 1時間30分 程度



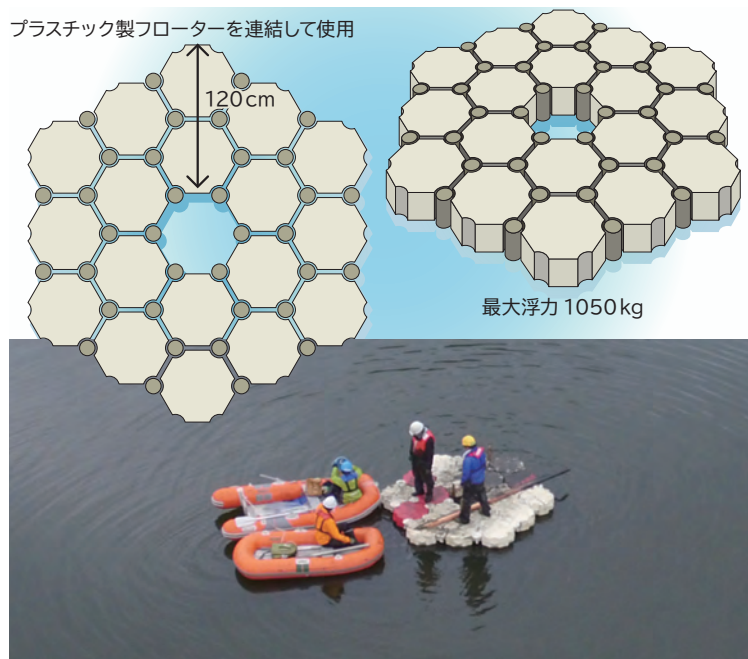
左の写真：
ロシアンサンプラーを使用した掘削調査。
(2009年1月
三重県志摩市)

右の写真：
ロシアンサンプラーで採取された泥の試料。

湖上での掘削方法

地層の採取は陸上だけでなく、湖や池でも行う。水面が結氷しない季節あるいは氷が十分に厚くならない地域では、フローター（プラスチック製の浮き）を使って作業のための足場とする。フローターには様々なタイプがあり、多くの場合、プラスチック製の小さなものを組み合わせて使用する。フローター上では、主にロシアンサンプラー、塩ビパイプ（次頁参照）、ハンディジオスライサー（後述）を使用した作業を行う。

プラスチック製フローターを連結して使用



ロシアンサンプラーを使用した掘削調査。
(2018年11月 三重県南伊勢町)
(写真撮影・提供 松本 弾)

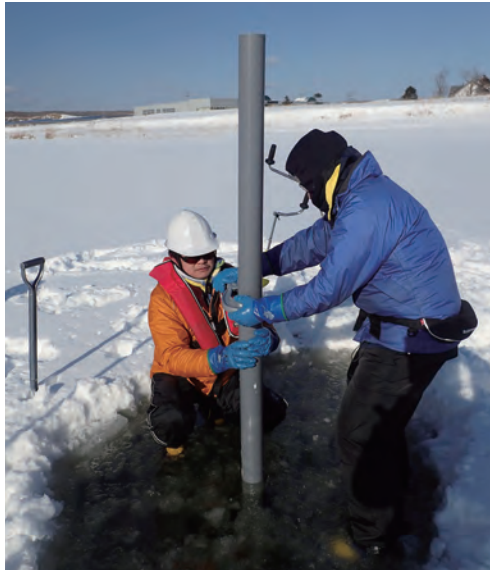
手掘り式

塩ビパイプの押し込みによる採取



結氷した池での塩ビパイプを使用した掘削調査。氷にアイドリルで穴を開け、そこにパイプを突き刺して湖底の堆積物を採取する。(2021年2月 北海道白糠町)

水深の浅い湖や池では、水上に浮かべたフローターや結氷した氷の上から、塩ビパイプを突き刺して試料を採取することがあります。ロシアンサンプラーなどに比べて多くの試料を採取することができるため、分析用試料の確保に適しています。また、表層付近の堆積物を乱すことなく採取することができます。



掘削のサイズ

直径10cm程度の穴×
湖底から1m程度

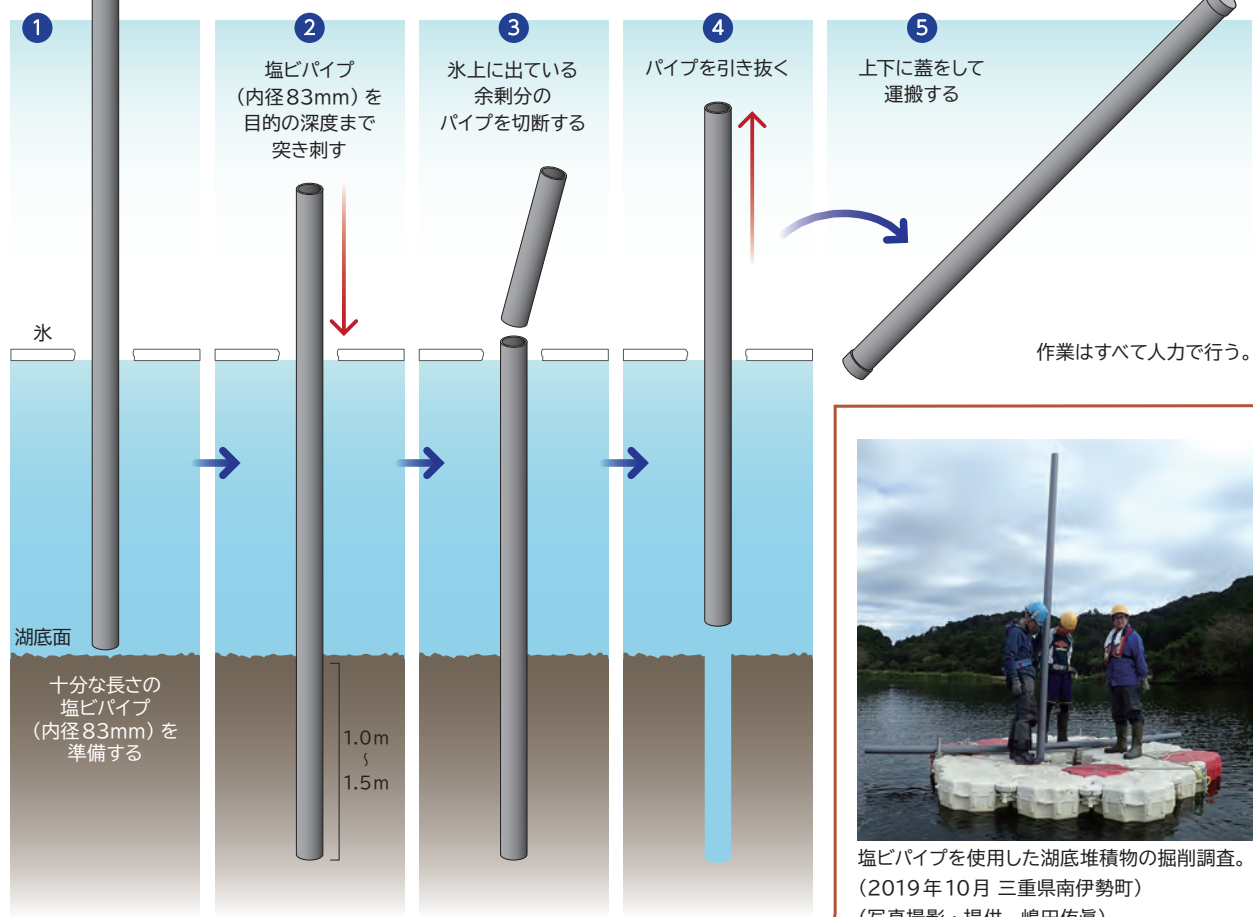
掘削作業に必要な面積

1.5m×1.5m程度

所要時間

1地点につき
30分～1時間程度

塩ビパイプによる湖底堆積物の掘削方法



シンウォールサンプラーは、円筒型の試料を採取することができます。不攪乱試料を採取することができるため、分析用試料を採取するのに適しています。ただし、サンプラーが重いため、4～5名程度で運用する必要があること、試料を引き抜くために三脚を組む必要があることなどのデメリットがあります。

掘削のサイズ 直径 7cm 程度の穴×深さ 5～6m 程度

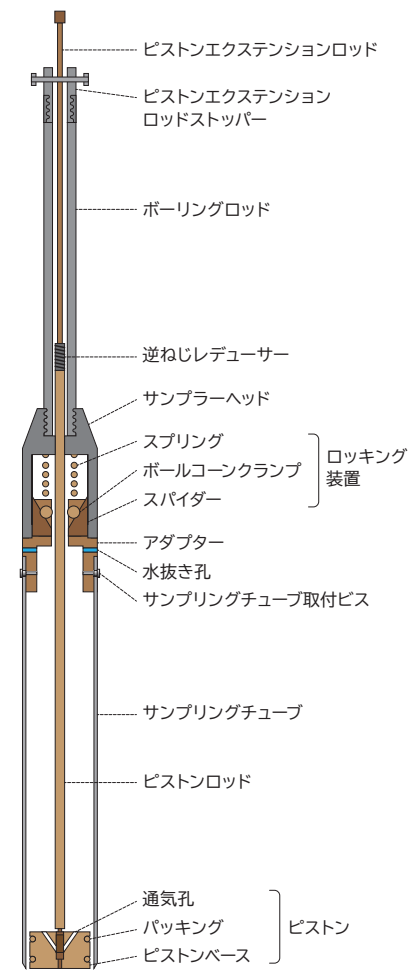
掘削作業に必要な面積 3m×3m 程度

所要時間 1 地点につき 5時間 程度



シンウォールサンプラーで採取された試料。現場において試料を押し出し、プラスチックケースに移し替えて運搬する。(2011年2月 徳島県阿南市) (写真撮影・提供 岡村行信)

シンウォールサンプラーの構造





地層の掘削方法

ジオスライサー (地層抜き取り装置)

「ジオスライサー」は
復建調査設計株式会社の登録商標です。

「地層抜き取り装置」と呼ぶことがあり、その名の通り地下の地層を抜き取るように採取することができます。ジオスライサーは他の手掘り式の掘削器具に比べ、広い幅の地層断面を観察することができるという利点があります。同様の大きさの断面を観察しようとした場合、大量の土砂を掘り起こすトレンチやピット調査が必要になりますが、ジオスライサーを用いると抜き取る土砂を少なくすることができます。このため、作業効率を大幅に向上させるとともに、周囲の環境への影響を少なくすることができます。

ジオスライサーには様々なタイプがあり、大まかには人力で運用する「ハンディジオスライサー」と、重機を使う「ジオスライサー」に分けられます。ジオスライサーには、工事現場の矢板をサンプルボックスに利用したロングタイプ（または大型ロングタイプ）や、より広い地層面を観察するために作られた大型幅広タイプがあります。

地層抜き取り装置 ハンディジオスライサー

ハンディジオスライサーは、ハンドコアラーやロシアンサンプラーよりも多くの試料を確保できるため、分析用試料を採取するのに適しています。また、薄い箱型のサンプルボックスで採取するために地層面の観察がしやすいという利点もあります。サンプルボックスを地中に入れるには二通りのやり方があり、ホームセンターで販売しているハンマー（ショックレスハンマーやかかけや等）で打ち込む方法と、専用のバイブレーターで振動をかけながら押し込む方法です。

ハンディジオスライサーは人力で運用することができ、作業に必要な人数も2～3名程度です。調査に必要な面積は、サンプルボックスの引き抜きに三脚を使用した場合に3m×3m程度、三脚を使用しなかった場合はそれ以下となります。所要時間は1地点につき30分～1時間30分程度と比較的短いため、周囲の環境に対する影響を少なくすることができます。

掘削のサイズ

7cm×15cm×
深さ1～3m程度の箱型の穴
深さは最大で3m程度

掘削作業に必要な面積

3m×3m程度

所要時間

1地点につき
30分～1時間30分程度



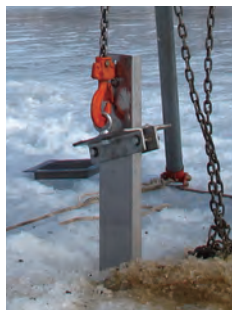
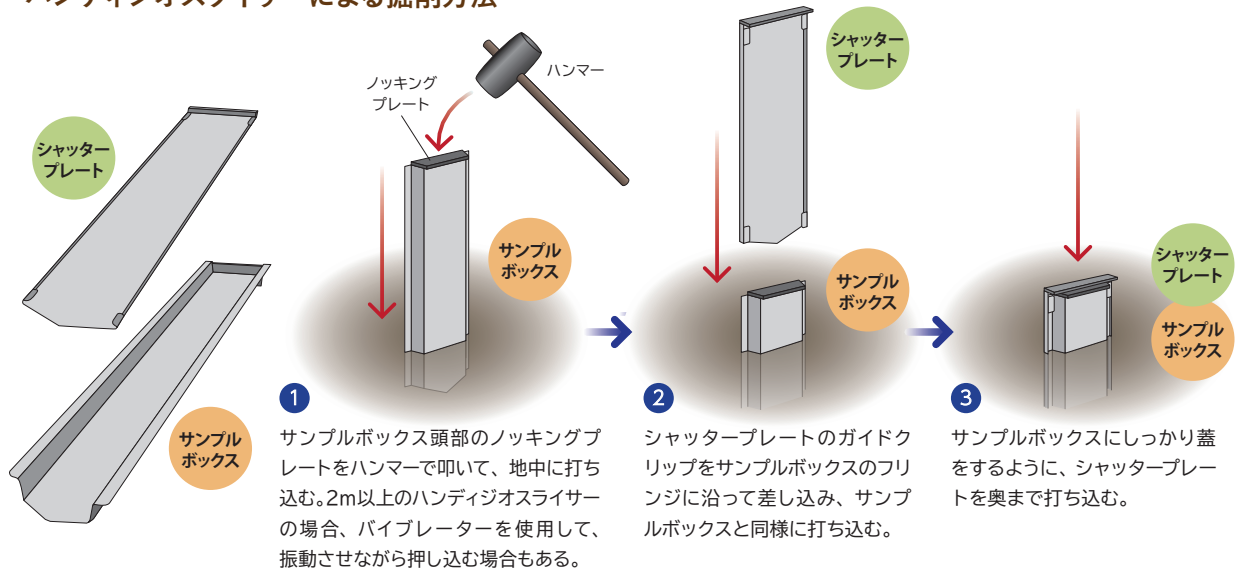
ショックレスハンマーでハンディジオスライサーを打ち込む様子。
(2015年5月 北海道浜中町)



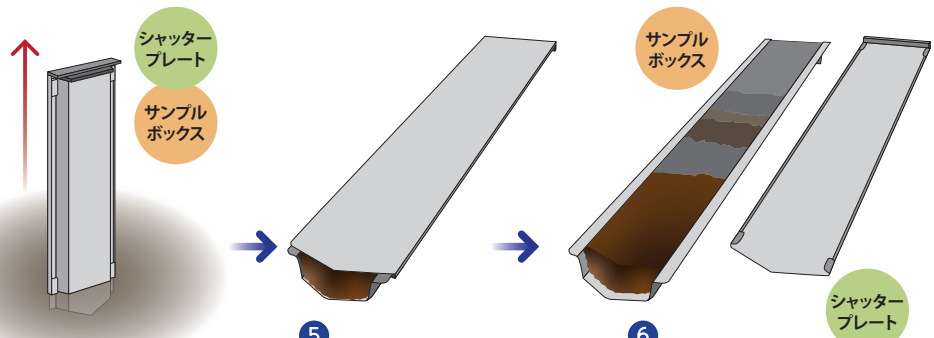
氷上でのジオスライサーによる試料採取の様子。アイスドリルで氷に穴を開け、湖底の泥を採取する。単管パイプで三脚を組み立て、採取のために打ち込んだスライサーをチェーンブロックで引き抜く。

(2015年2月 北海道厚岸町)

ハンディジオスライサーによる掘削方法



4 ノッキングプレートにチェーンブロック（ジャッキ式の引抜機）をかけて、サンプルボックスとシャッタープレートを一緒に引き抜く。



ハンディジオスライサーによる掘削調査。パイブレーターで振動をかけて押し込む様子。
(2017年2月千葉県山武市)



左がサンプルボックス、右がシャッタープレート。



パイブレーター：サンプルボックスやシャッタープレートを挟み、振動をかけることによって地中に押し込みやすくする機材。電気で動くため、小型の発電機と合わせて運用する。



クローラークレーンを使用したジオスライサー調査。
(2012年10月 茨城県北茨城市)

ロングタイプのジオスライサーは、より深いところの試料を確保したいときや、ハンディジオスライサーでは堅くて打ち込めないときに利用します。多くの場合、工事現場で使用する矢板をサンプルボックスとして使います。矢板は非常に重いため、移動式クレーン（クローラークレーンなど）を使って運用します。サンプルボックスとシャッタープレートの打ち込みには、工事現場で使用するパイプロハンマーを使います。

調査に必要な面積は、使用するクレーンなどによって異なりますが、鉄板で地表面を保護するなどの対応を行い、周辺環境に対する配慮は十分に行います。掘削のための所要時間は、深さ4mのジオスライサーであれば1地点につき1時間程度ですが、準備および撤収作業に重機を使用するため、準備や撤収だけで1時間以上、場合によっては半日くらいの時間がかかることもあります。



上の写真：小型クローラークレーンを使用したジオスライサー調査。
(2009年11月 福島県南相馬市)

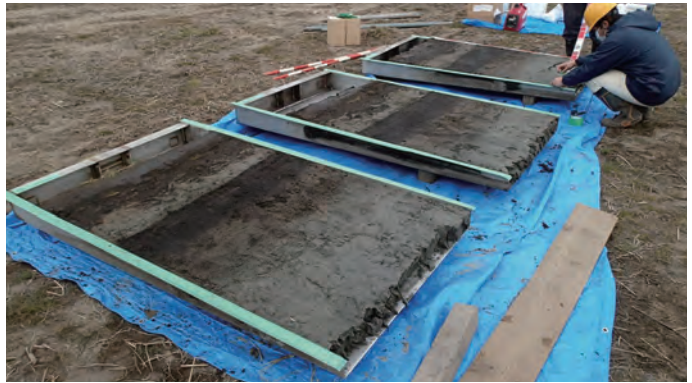


左の写真：ジオスライサー調査で採取した試料。

- 掘削のサイズ 15cm×40cm×深さ4～6m程度の箱型の穴
場合によっては、工事用の矢板を使用してさらに深く掘削することもある。
- 掘削作業に必要な面積 使用するクレーンなどによって異なる。
- 所要時間 地点につき1時間程度（深さ4mの場合）
準備および撤収作業は、重機を使用するため1時間以上の時間がかかることもある。

大型幅広タイプのジオスライサーの運用方法は、基本的にロングタイプのジオスライサーと同じです。大型幅広タイプは、幅が約1mあり、地層の構造をより詳細に観察することができます。

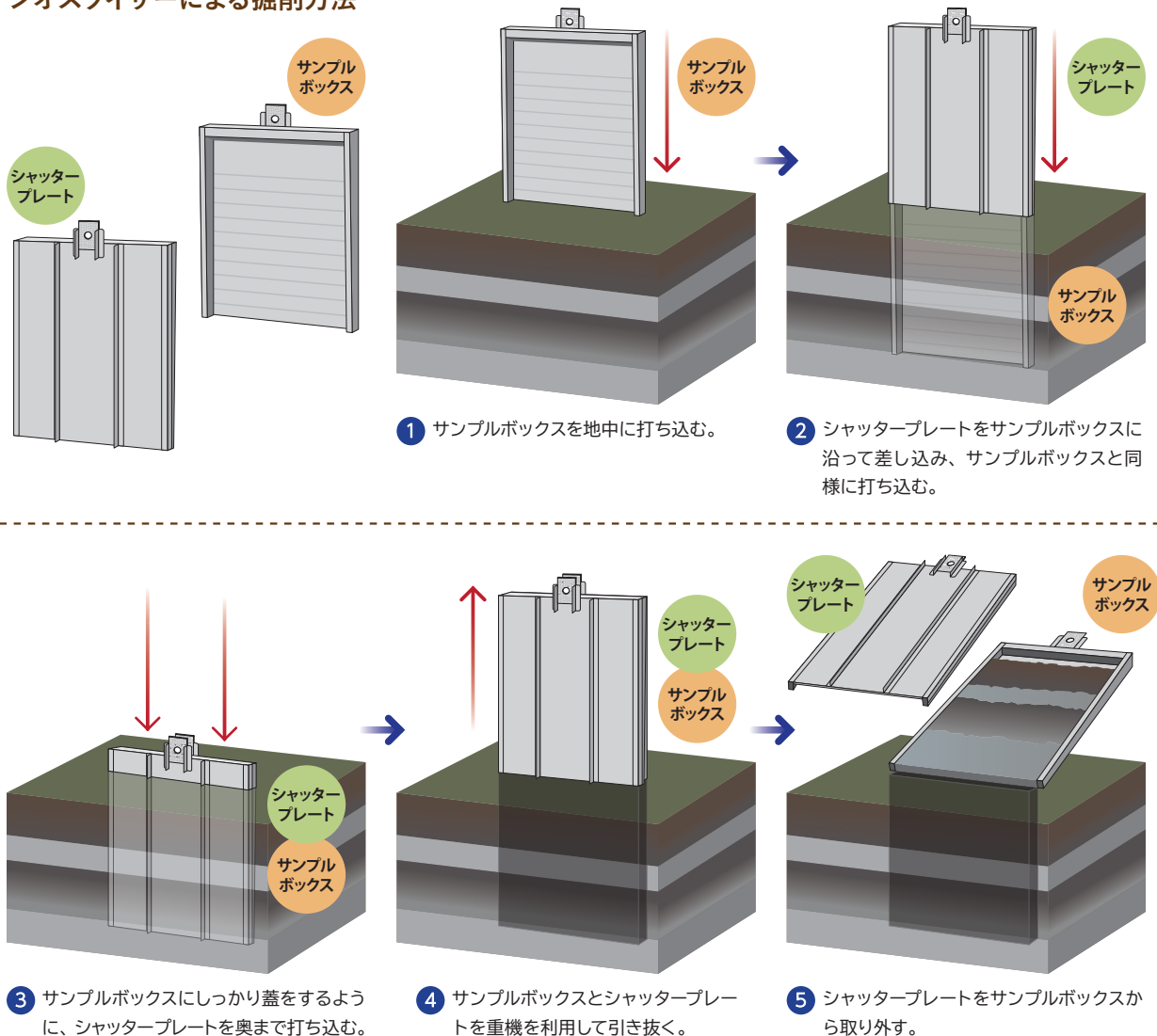
- 掘削のサイズ 15cm×100cm×深さ2m程度の箱型の穴
- 掘削作業に必要な面積 使用するクレーンなどによって異なる。
- 所要時間 1地点につき1時間程度
準備および撤収作業は、重機を使用するため1時間以上の時間がかかることもある。



上の写真：ジオスライサー（大型幅広タイプ）を用いた試料採取。（2013年3月 宮城県仙台市）（澤井, 2014 GSI地質ニュースより）

下の写真：ジオスライサー（大型幅広タイプ）。サンプルボックス（奥）とシャッタープレート（手前）。

ジオスライサーによる掘削方法





地層の掘削方法

機械ボーリング

重機を使用して地質試料を採取する方法として、最もよく用いられる工法です。地中に円筒型の穴を開ける機械（試錐機^{しすいき}）を使用した掘削方法で、柱状の試料（ボーリングコア、コア、コア試料などと呼ぶ）を採取することができます。津波堆積物の調査では、直径約10cmの大きなコアを、地下数十メートル掘り下げることがあります。試錐機には様々な形式があり、状況によって採取方法を変えます。例えば、深さ5m程度までは打込式、それより深いところはロータリー式で採取することがあります。試錐機を立てるための櫓を設置するため、調査に必要な面積は、10m×10m程度と比較的大きくなってしまいます。櫓を組むために多くの時間が必要な上、深いところからコアを回収するのは時間がかかるため、所要時間は1地点につき数日必要なことがあります。

機械ボーリング > ロータリー式ボーリング

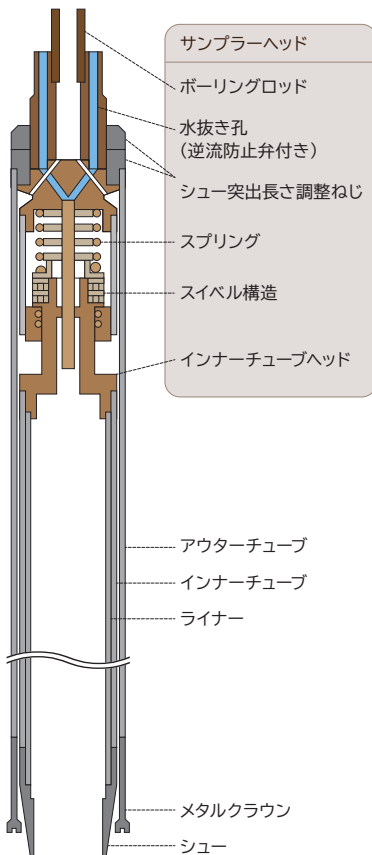
ロータリー式ボーリングは、深さ5mより深いところの地層を採取する際に用いられる工法です。

掘削のサイズ 直径10～15cm程度の穴×深さ5m程度までは打込式、それより深いところはロータリー式で採取することが多い。

掘削作業に必要な面積 10m×10m程度
ボーリング機械を立てるための櫓を設置するため、調査に必要な面積は、比較的大きい。

所要時間 1地点につき 数日

ロータリー式ボーリングの構造



① 機械ボーリングの調査風景。(2009年1月 三重県志摩市)

② 機械ボーリングの調査風景。状況によって、櫓の大きさや形状を変える。(2011年1月 静岡県富士市)



③ 機械ボーリングで採取された試料。現場において試料を押し出し、プラスチックケースに移し替えて運搬する。(2018年12月高知県須崎市)





地層の掘削方法

トレンチ・ピット調査

トレンチ・ピット調査は、大きな溝や穴を掘って、その壁面を観察します。大きな溝を「トレンチ」、比較的小さな穴を「ピット」と呼びます。トレンチの掘削は重機を使用することが多いですが、ピットは人力で掘削することもあります。トレンチ・ピット掘削は、壁面から大量の試料を採取できる反面、広い場所が必要なのであまり実行することができません。トレンチやピットを掘削するためには多くの時間が必要なため、所要時間は1地点につき1日～数日必要なことがあります。



トレンチ調査の様子。掘削はパワーショベル（油圧ショベル）を使用。（2003年5月 北海道厚岸町）
写真左側の壁面に見られる砂層（灰色の層）が、過去の巨大津波によって残された津波堆積物。

掘削のサイズ

掘削する溝の大きさは調査によって異なる。

掘削作業に必要な面積

掘削する溝の大きさ、使用するパワーショベル（油圧ショベル）などによって異なる。

所要時間

1地点につき 1日～数日



ピット調査の様子。園芸用シャベルを使用して、人力で掘削。（2020年7月 青森県五所川原市）



ピット調査の様子。園芸用シャベルを使用して、人力で掘削。（2012年11月 青森県三沢市）（写真撮影・提供 谷川晃一朗）



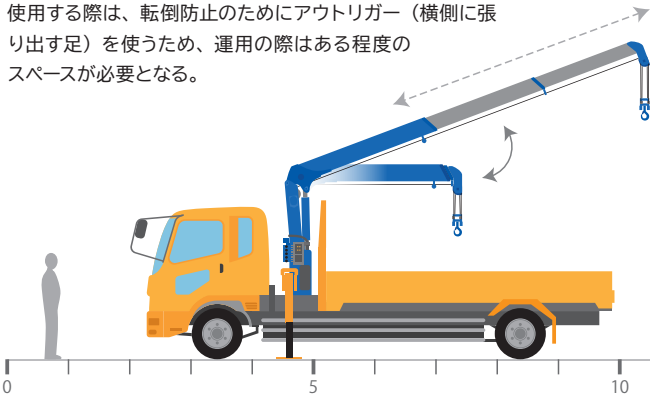
調査で使用する重機 ①

大型のジオスライサー調査、機械ボーリング、トレンチ調査を行う際には、重機を使用します。ここでは、現地調査を想像していただけるように、使用する重機類を紹介します。

重機は、メーカー・機種により大きさが異なります。あくまで大きさの目安となります。

積載形トラッククレーン

通常のトラックを補強してクレーン装置を搭載したもの。ジオスライサーや機械ボーリングの調査の際、資材の搬入・搬出のために使用する。軽トラック以上の大きさの様々なタイプがある。つり上げ荷重（つり上げのためのフック等を含めた最大荷重）が3トン未満のものが多い。クレーン装置を使用する際は、転倒防止のためにアウトリガー（横側に張り出す足）を使うため、運用の際はある程度のスペースが必要となる。



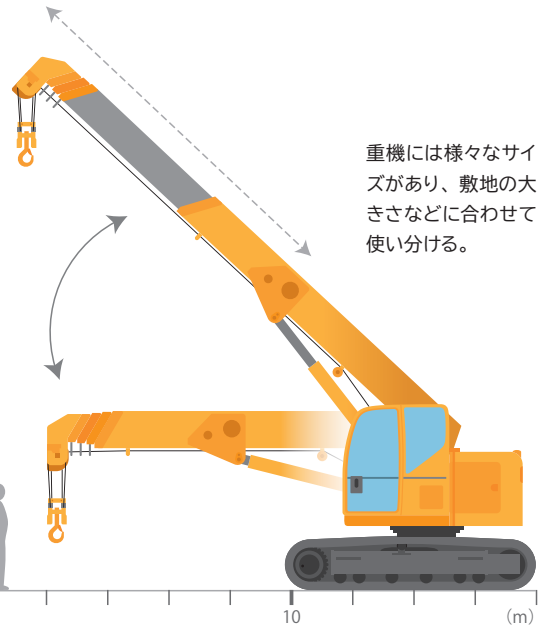
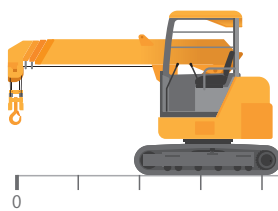
左側の重機がクローラークレーン、右側がトラッククレーン。
(2012年10月 茨城県北茨城市)

クローラークレーンを使用したジオスライサー調査。
(2009年12月 福島県富岡町)



クローラークレーン

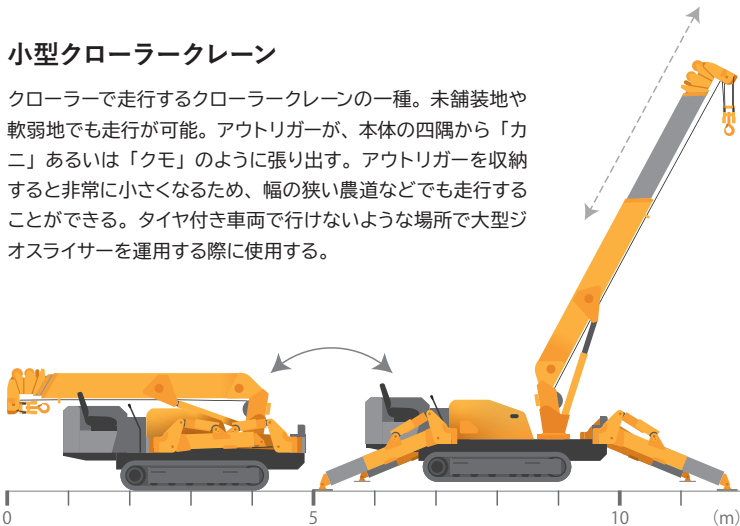
大型ジオスライサーを用いた調査の際、最も頻りに運用される重機。クローラで走行することができるため、未舗装地や軟弱地でも走行が可能。つり上げ荷重が5トン未満のクレーンを使用することが多い。



重機には様々なサイズがあり、敷地の大きさなどに合わせて使い分ける。

小型クローラークレーン

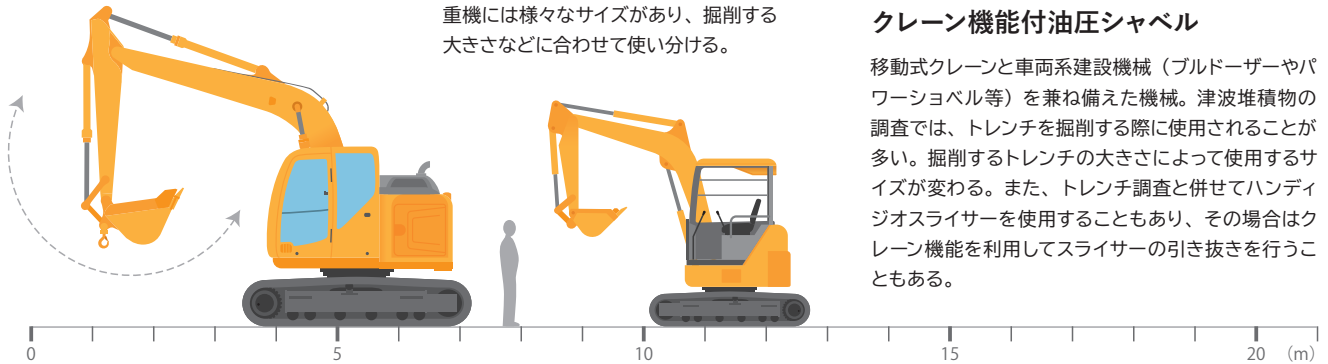
クローラで走行するクローラークレーンの一種。未舗装地や軟弱地でも走行が可能。アウトリガーが、本体の四隅から「カニ」あるいは「クモ」のように張り出す。アウトリガーを収納すると非常に小さくなるため、幅の狭い農道などでも走行することができる。タイヤ付き車両で行けないような場所で大型ジオスライサーを運用する際に使用する。



小型クローラークレーンを使用したジオスライサー調査。
(2009年11月 福島県南相馬市)



調査で使用する重機 ②



クレーン機能付油圧シャベル

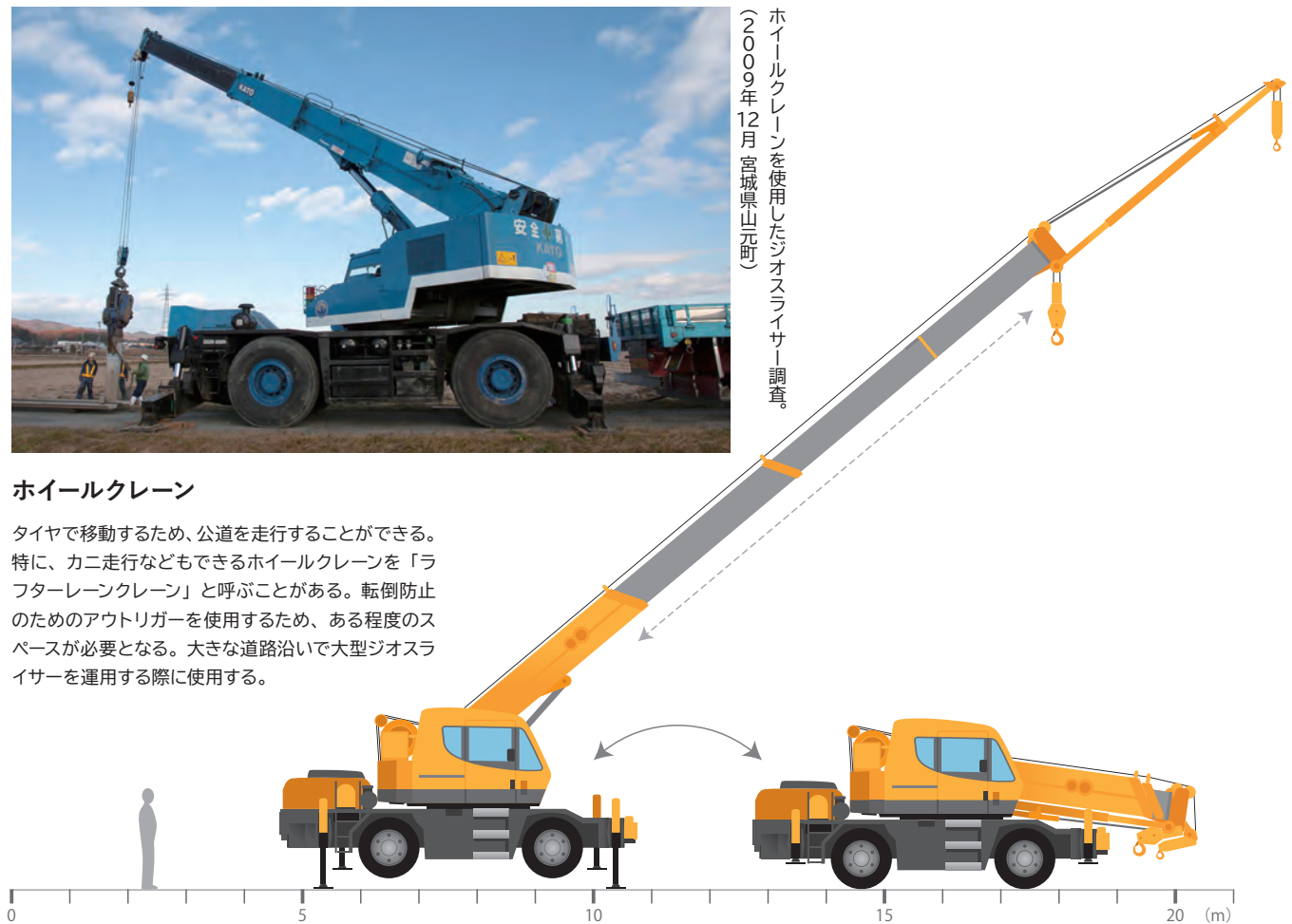
移動式クレーンと車両系建設機械（ブルドーザーやパワーショベル等）を兼ね備えた機械。津波堆積物の調査では、トレンチを掘削する際に使用されることが多い。掘削するトレンチの大きさによって使用するサイズが変わる。また、トレンチ調査と併せてハンディジオスライサーを使用することもあり、その場合はクレーン機能を利用してスライサーの引き抜きを行うこともある。



ホイールクレーンを使用したジオスライサー調査。
(2009年12月 宮城県山元町)

ホイールクレーン

タイヤで移動するため、公道を走行することができる。特に、カニ走行などできるホイールクレーンを「ラフターレーンクレーン」と呼ぶことがある。転倒防止のためのアウトリガーを使用するため、ある程度のスペースが必要となる。大きな道路沿いで大型ジオスライサーを運用する際に使用する。





掘削以外の調査方法

過去の津波が残した痕跡を明らかにするためには、地層を直接観察するだけではなく、様々な機器を使います。ここでは、地下の構造を知るために使う地中レーダー探査とドローンを使用したフォトグラメトリを紹介します。

掘削以外の調査方法 地中レーダー探査

地中レーダー探査は、電磁波をアンテナから地下に放射し、その反射波の走時（ある場所を出発して、ある観測点に到着するまでの時間）を計測することで地下の様子を知ることができる方法です。



カートタイプの地中レーダーを使用した探査風景。(静岡県静岡市)
カートに受送信センサーやデータロガーが一体となったもの。地面が比較的平坦であった場合、作業効率が良いこのタイプが採用されることが多い。(写真撮影・提供 田村 亨)

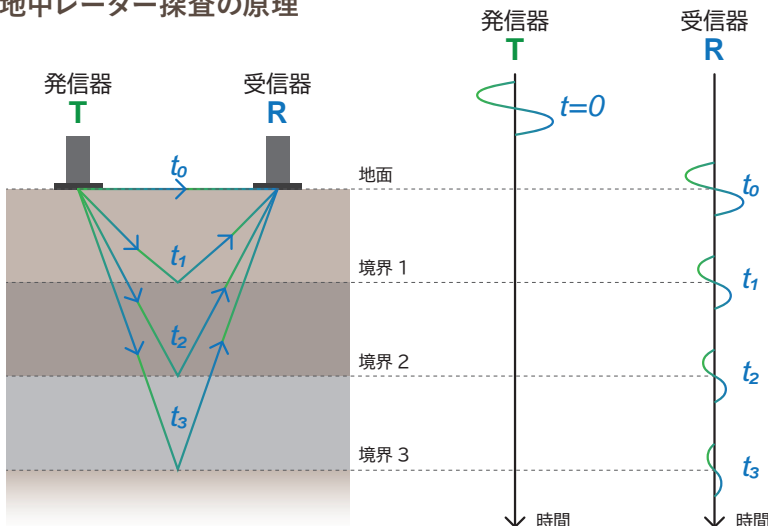


ハンドルタイプの地中レーダーを使用した探査風景。(鳥取県鳥取市 鳥取砂丘)
アンテナを等間隔で移動させた後、電磁波を受送信することで、その場所におけるデータを得る。調査対象地域に測線を設け、測線沿いにデータ取得する。(写真撮影・提供 田村 亨)



rollerタイプの地中レーダーを使用した探査風景。(宮城県仙台市)
中央にある黄色いセンサー2点が地面を滑り、探査する。(写真撮影・提供 田村 亨)

地中レーダー探査の原理



発信器から、電磁波（パルス波 100MHzまたは250MHz）を地中へ発信し、受信器で反射する波を捉える。電磁波は電気特性が変化する面（粒度、鉱物などの構成が変わる地層境界）で反射する波を捉える。得られた結果は研究所に持ち帰り、解析することで地下の構造を知ることができる。

地中レーダー探査は各地で利用されており、地下空洞、埋設物（埋設管など）の有無、その位置を特定することができる。

なお、調査で使用する機器は、電波法上問題の無いレベルの電磁波を使用し、電波障害および健康障害などは生じない。

写真測量は、写真から地形などの情報を読み取る方法で、100年以上の歴史のある技術です。特に、複数のデジタル写真をコンピュータで解析する方法をフォトグラメトリと言います。

フォトグラメトリで使う写真は、小型無人航空機（ドローン）を使って撮影します。ドローンは、カーナビなどで使用する衛星の情報を取得しながら飛行するため、自分自身の正確な位置を記録しながら写真を撮影できます。この位置情報と写真を合わせて、コンピュータ上で画像を合成・構築していきます。

ドローンによる撮影には、時間や天候による制約があります。まず、樹木や建物の影が長い場合、コンピュータ上での写真の合成が難しくなります。この問題を避けるため、影の長い早朝や夕暮れ時には撮影しないようにします。また、風が強いとドローンの飛行姿勢が安定しないため、風の強い日は飛ばすことができません。このため、風速がそよ風程度になるまで現地で待つこともあります。

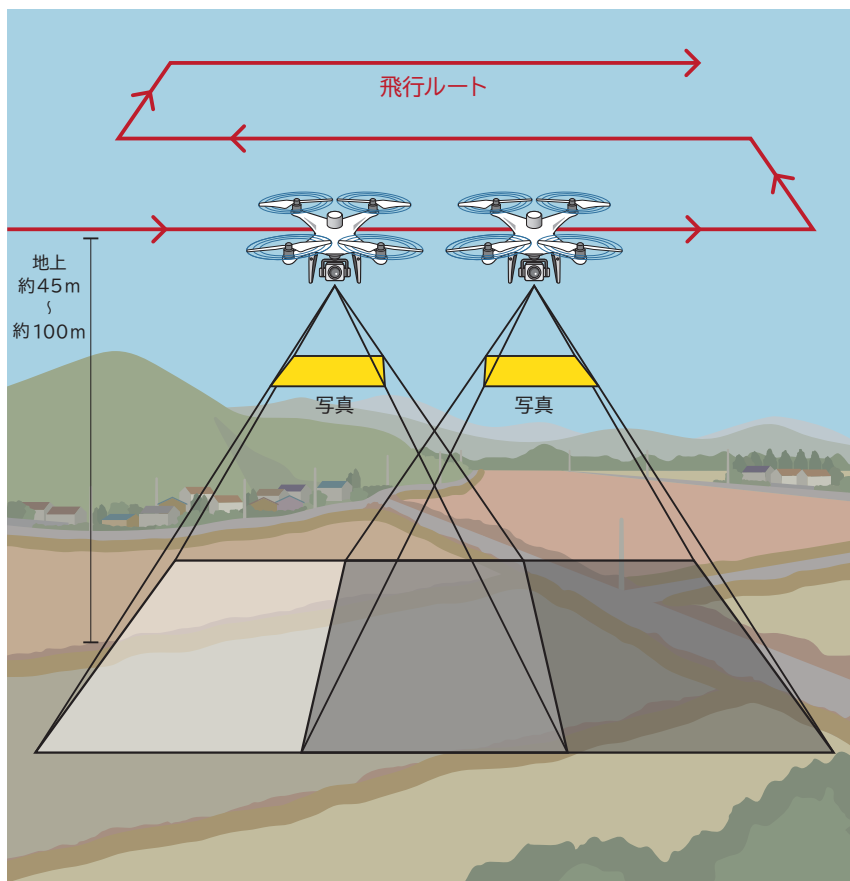
最新のドローンには障害物回避のためセンサーがついているため、衝突などのリスクは非常に低いと言えます。ただし、急な強風など、万が一の場合は人によるマニュアル操作となるため、ドローンの操作は一定時間以上の訓練を受けた者が行います。



離着陸時におけるカメラ・本体の保護や、周囲の第三者にドローンの離着陸場所を知らせるため、ランディングパッドを使用する。

(2021年5月 北海道浜中町)

プログラムによるドローンの飛行と写真撮影



写真測量に使用するドローンの例。カメラと一体型の比較的小さい機体（上）搭載カメラを交換できる大きい機体（下）があり、状況によって使い分ける。（写真（下）撮影・提供 嶋田侑真）

ドローンは、予め決められたルートを飛行しながら一定間隔で写真を撮影することで、隣り合う写真が重なり合うようにする。

飛行ルートの位置は、外国の衛星測位システムであるアメリカのGPS、ヨーロッパのGalileo（ガリレオ）、中国のBeiDou（北斗＝北斗）などを利用して決定し、条件が良ければその誤差は水平方向で1cm+1ppm（1km離れると誤差が1mm増える）と言われる。

地層の分析

過去の津波に関する情報は、地層を採取した現場ですべてがわかるわけではありません。採取した地層を研究室に持ち帰り、様々な分析を行うことによって、大きな津波の繰り返し間隔や当時の浸水範囲などを推定します。



地層の分析

堆積物を X線で観察する

堆積物を観察するときは、肉眼で表面を見るだけでなく、X線を利用して試料の内部構造も確認します。X線は電磁波の一種で、「レントゲン撮影」にも使われている身近なものです。X線は物質を通過するときに減衰しますが、通過する物質の密度によってその透過量が違うため、「堆積構造」と呼ばれる地層中の細かい縞々を見ることができます。最近では、医療用X線CT (Computed Tomographyの略、日本語では「コンピュータ断層撮影」)を使い、様々な角度からX線を照射して堆積物の内部構造を立体的に観察することが可能です。その結果、肉眼では確認することが難しい「見えにくい津波堆積物」を見つけることができるようになりました。一方で、柔らかい堆積物や水を多く含んだものは崩れやすいため、試料を採取した状態のまま装置のある研究所まで運搬することは非常に難しいという問題点もあります。

軟X線写真撮影装置

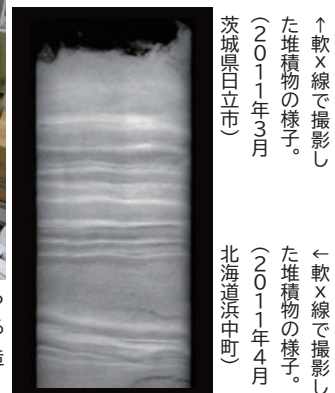
X線のなかでも、比較的エネルギーの小さく、透過力の弱いものを軟X線と呼びます。私たちが使用している機械は、軟X線を一方向から照射して一枚の画像とします。このとき、厚いものを撮影すると、いろいろなものが重なった状態で撮影されるため、堆積構造がわかりにくい画像となってしまいます。そのため、堆積物をなるべく薄くスライスするように加工し、堆積構造の重なりを少なくするように心がけます。ただし、薄く加工する過程で大切な試料を壊さなければならないという欠点があります。また、大きな石ころ(礫)はスライスすることができないため、礫を含む試料を撮影することはできません。



下側にある扉を開けて、試料を入れられるようになっている。X線を照射する時間などを調整し、最も良く堆積構造が見える条件を探す。



↑軟X線で撮影した堆積物の様子。
(2011年3月
茨城県日立市)



←軟X線で撮影した堆積物の様子。
(2011年4月
北海道浜中町)

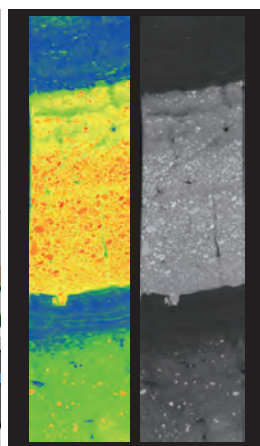
Supria Grande (日立製作所)。柱状の堆積物を寝かせて地層の断面を撮影する。柔らかい堆積物だけではなく、固い岩石や化石を撮影することもできる。



X線CT撮影装置

医療検査用と同じ種類の機械です。採取した試料のなかに大きな礫があっても、それがどのようにつながっていたかを知ることができます。また、試料を壊さずに観察できるということも大きな利点です。

CTで撮影した堆積物の様子。
(2021年12月岩手県野田村)





地層の分析

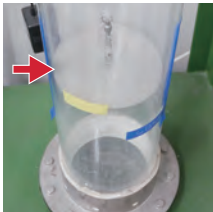
砂粒を観察する

砂粒の特徴を知ることは、その地層の成り立ちを考える上で非常に重要です。例えば、砂粒がどのような鉱物からできているかを知ることによって、どこから運ばれてきたものかを知ることができます。また、大きさを知ることによって、砂がたまったときの水の流れの様子を推定できます。

地層を構成する砂粒の大きさを「粒度」と呼び、粒度の調べることを粒度分析と言います。粒度分析には様々な方法がありますが、私たちは主に沈降管を使った方法と画像解析を利用した方法の2種類を利用します。

沈降管による粒度分析

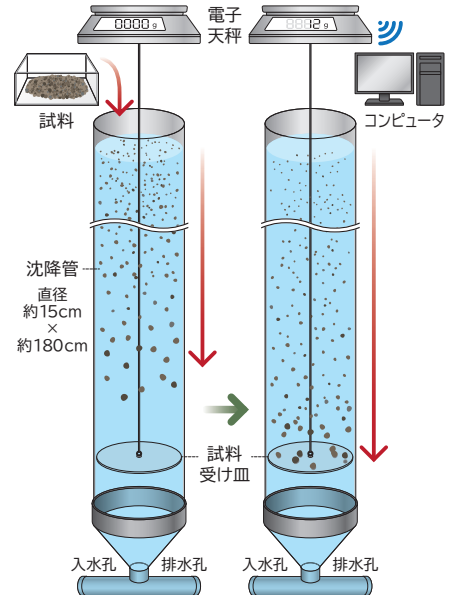
沈降管を使う方法は、水を満たした大きなパイプの上から試料を落とす方法です。水の中では、礫のような重い石ころは早く落ちるのに対し、細かい砂粒はなかなか落ちてきません。これまでの経験から、どれくらいの大きさのものであれば、水の中でどれくらいの速度で落ちるかが細かくわかっています。パイプの下に計量のための受け皿を準備しておくことで、毎秒の沈降量を調べ、その試料がどれくらいの大きさの粒子の集まりなのかを推定することができます。



落ちてきた堆積物を受ける
試料受け皿



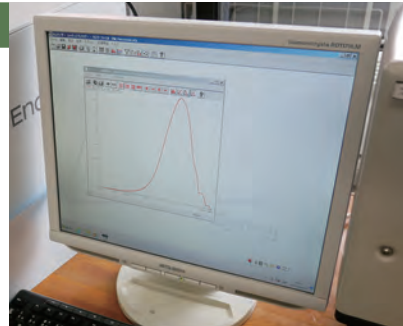
沈降管による観察



電子天秤で、試料受け皿に堆積する試料の重さ（沈降量）を毎秒計測する。電子天秤のデータはコンピュータに送られ、リアルタイムで堆積物の重さを計測することができる。

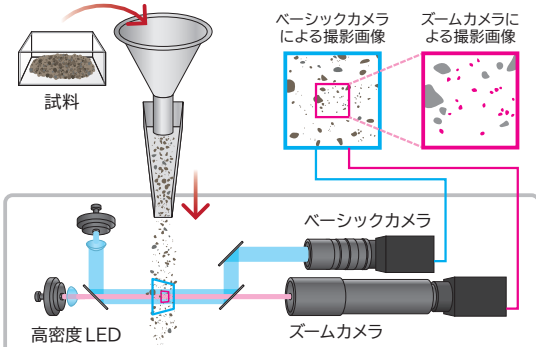
画像解析による粒度分析（カムサイザー）

沈降管を使う方法がある程度の経験則に基づくのに対し、画像解析を利用した方法は実際に粒の形状を写真撮影し、それを計測・解析する方法です。実際の計測では、機器の上から試料を落とし、落ちていく粒の写真を大量に撮影します。この写真をコンピュータが解析し、どのような大きさ・形状のものが落ちていったのかを判別し、粒度の組成を計算します。

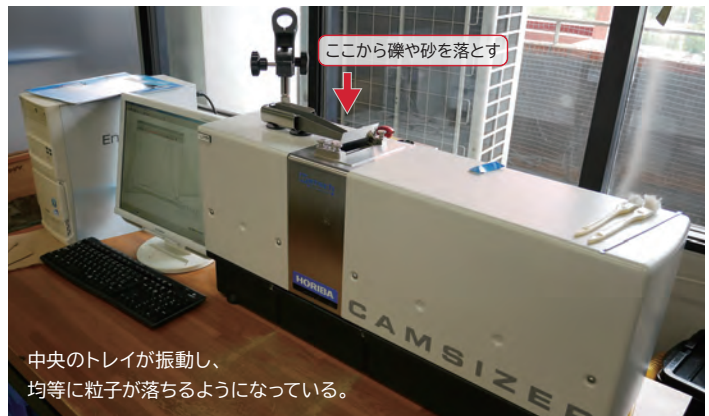


計測結果はカムサイザーに繋がったコンピュータの画面で見ることが出来る。

画像解析の方法



ベーシックカメラで大粒子、ズームカメラで小粒子を撮像する。2台のカメラで撮影することにより、高精度の測定ができる。



ここから礫や砂を落とす
中央のトレイが振動し、均等に粒子が落ちるようになっている。



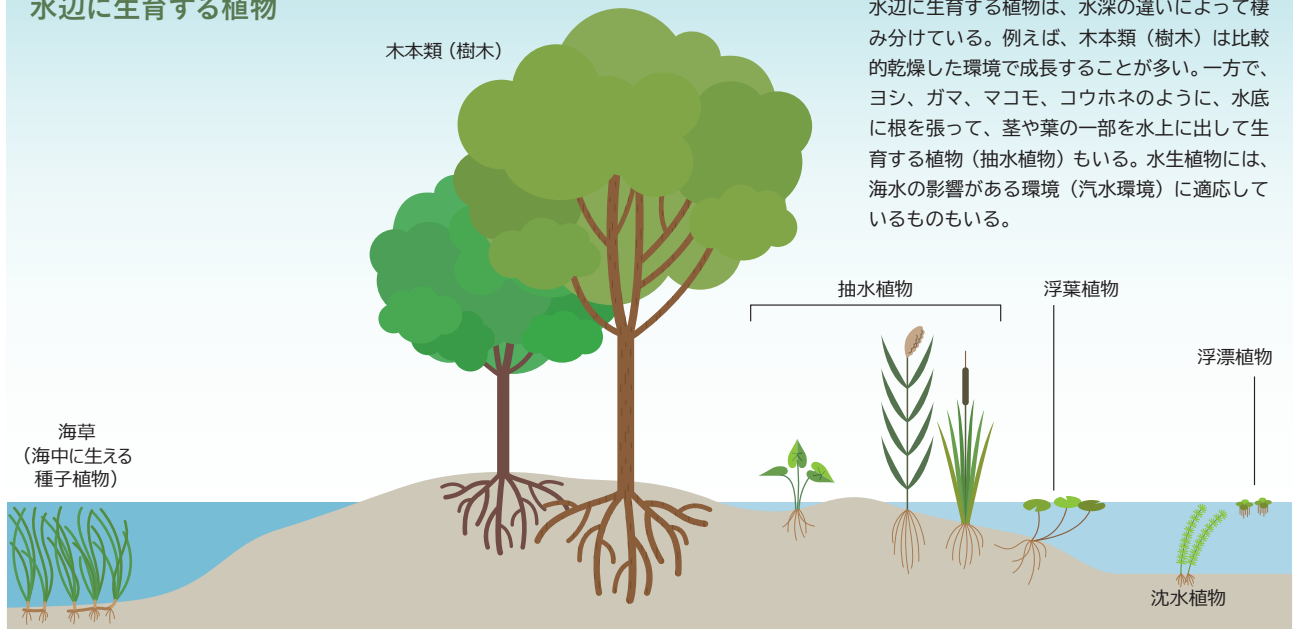
地層の分析

顕微鏡で化石**を観察する

堆積物の中には、非常に小さい生物の遺体（化石）が含まれています。化石を詳細に調べることで、地層の起源（海か陸か）を知ることができ、その堆積物が津波によってできたのかどうかを判断する材料になります。また、津波が浸水したときにそこはどのような環境だったのかを知ることができます。

** 化石は岩石のように固いというイメージがありますが、私たちは柔らかい地層中に見られる生物の遺骸もひととために「化石」と呼びます。

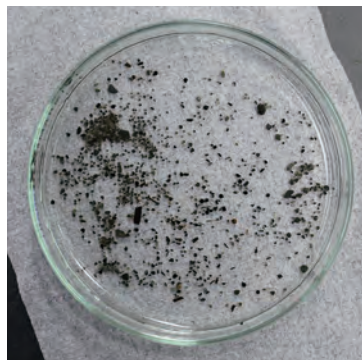
水辺に生育する植物



研究室に設置された実体顕微鏡。



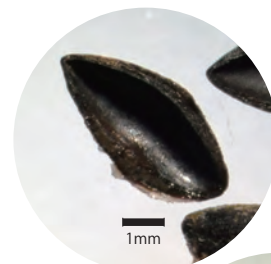
堆積物を篩（ふるい）を使って洗い、泥と植物化石を分離する。



篩で洗った後に残ったもの（残渣 ざんさ）をペトリ皿（シャーレ）の上に移し、実体顕微鏡で観察しながら植物の種子などをピンセットで拾い出す。

実体顕微鏡による観察

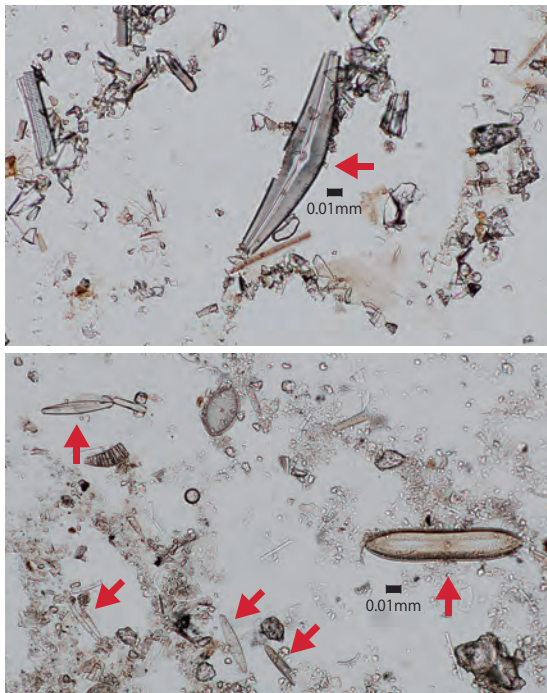
ふるい篩を使って堆積物を洗うと、細かい粒々が残ります。これらを実体顕微鏡で観察すると、植物の種子などが見つかることがあります。植物の種子の化石は、当時の環境を推定したり、年代測定に利用したりします。



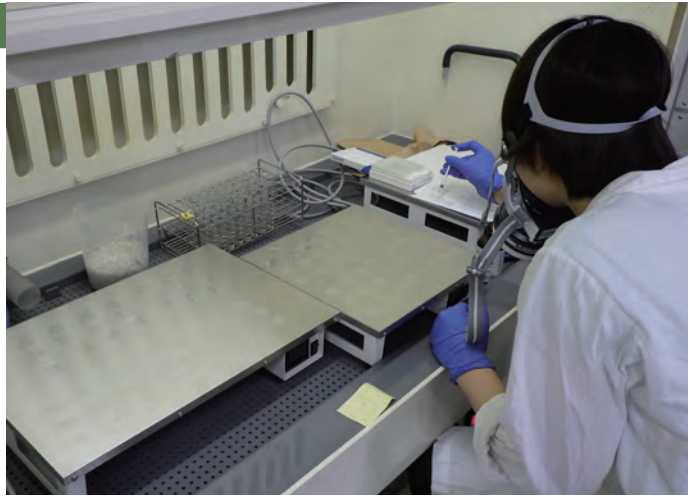
光学顕微鏡による観察

私たちは、さらに小さい生物のケイソウ類にも注目して研究を行っています。ケイソウ類は、単細胞藻類の一つで、淡水から海水まで水分の存在するあらゆる環境に適応して生育しています。それぞれの種は、環境によって棲み分けているので、現在と化石の種の組成を比較することで、堆積物がたまった当時の環境を推定することができます。

ケイソウ類は実体顕微鏡では観察できないほど小さいため、より小さいものを拡大観察できる光学顕微鏡を使用します。



顕微鏡で観察した画像。矢印がケイソウの化石。



化学処理した試料を、封入剤で小さなガラス板に固定して「プレパラート」と呼ばれる状態にする。封入剤は管理が必要な化学物質を含むため、保護具を身につけて処理する。



プレパラートに封入されたケイソウ化石を観察するために使用する光学顕微鏡。カメラを装着し、顕微鏡の画像をモニターに表示して観察する。

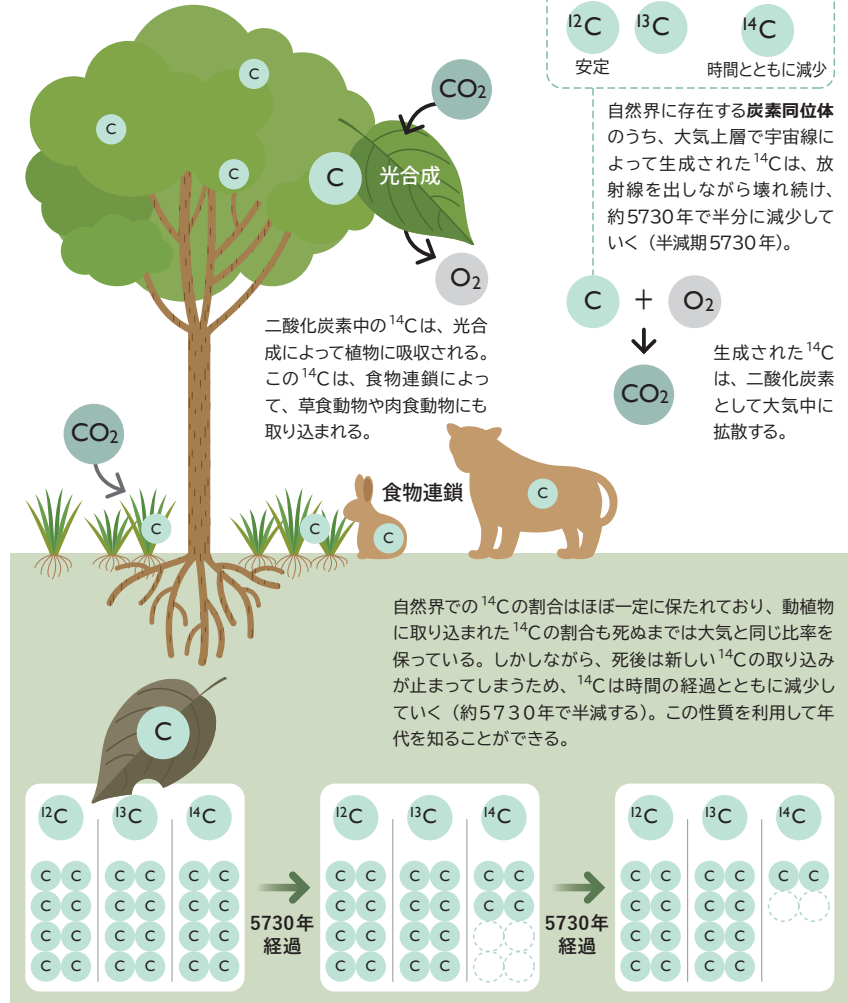
堆積物の年代を知る

地層中から見つかった津波堆積物がいつのものなのかを知るためには、堆積年代（その地層が堆積したのは何年前なのか）を調べる必要があります。私たちは、自然界に存在する放射性物質（炭素、鉛、セシウム）を使用して年代を調べます。また、地域によっては火山灰層が降下した年代を参考にすることもあります。

放射性炭素

放射性炭素（炭素14、 ^{14}C ）は、大気中にほぼ一定の割合で含まれています。植物は光合成によって放射性炭素を体内に取り入れるため、植物の体には大気と同じ割合で炭素14が維持されています。しかし、その植物が死んでしまうと、大気と同じ割合だった炭素14が時間とともに減っていきます。この減った割合を調べることで、植物化石を含む地層の年代を知ることができます。炭素14を利用した年代測定は、約6万年前から約400年前までの時代に利用できるとされています。

放射性炭素年代測定



ガンマ線測定装置

鉛210 (^{210}Pb) は自然界に存在する放射性物質です。鉛210は、水中の泥の粒子に吸着して沈降し、湖や湿地の地層中に取り込まれていきます。γ線（ガンマ線）を放出する多くの種類の核種***を検出できる機械を利用し、その濃度を計測します。鉛210が適用可能な時代は過去100年～150年程度と短く、最近の津波堆積物に対して行われる方法です。このほか、セシウム137 (^{137}Cs) を利用する方法もあります。

***「核種」とは、特定の原子の種類のことを言います。例えば、同じ炭素でも炭素12と炭素14は異なる核種です。放射性の核種は、種類によって出す放射線の種類（アルファ線、ベータ線、ガンマ線）が違います。



地層の分析

堆積物の 化学的な特徴を知る

堆積物がどのような環境でたまつたのかを知るために、化学的な分析を行うこともあります。例えば、分析の結果から海水中に特徴的に見られる成分（カルシウムや臭素など）が見つければ、その堆積物は海水の影響が強い環境で堆積したことがわかります。化石の分析と併せることによって、より信頼性の高い考察を行うことができます。

蛍光X線測定による分析

蛍光X線分析は、分析機器からX線を照射し、その結果として発生する特性X線（蛍光X線）を検出して主要元素の濃度変化分析を行う手法です。最新式のコアスキャナーでは、長さ1.5m程度のコア試料を、ミリ間隔で分析を行うことができます。比較的短い時間で分析できることも利点の一つです。

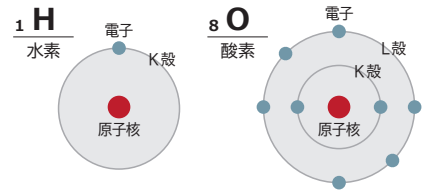
蛍光X線分析装置のしくみ

原子の構造

原子は、物質をつくっている最小の粒子で、100種類ほどが知られている。

原子の中心には、正（+、プラス）の電荷****をもった原子核があり、そのまわりを負（-、マイナス）の電荷をもつ電子がまわっている。原子核は、正の電荷をもつ陽子と、電荷をもたない中性子でできている。

電子はいくつかの層（電子殻）に分かれて存在し、それぞれの層（K殻、L殻、M殻...）に収容できる電子の最大数が決まっている。

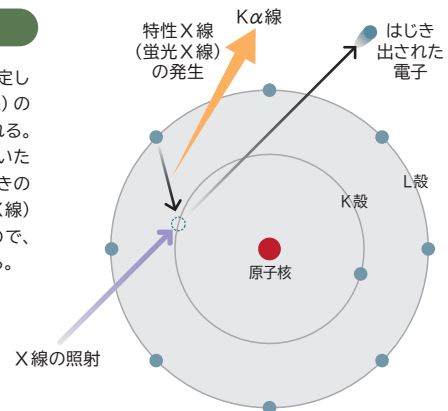


原子のもつ陽子の数を、原子番号という。水素の原子番号は1で、1つの陽子と1つの電子からなる。酸素の原子番号は8で、8つの陽子と8つの電子からなる。

****「電荷」とは、ある物体が帯びている電気の量であり、正または負の値を取る。電荷の量が大きいと、電磁場などから受ける力が大きくなる。

蛍光X線分析の原理

原子は、通常はエネルギーの低い状態で安定しているが、放射線（X線管球からの照射X線）の吸収によって内殻電子が外殻にはじき出される。エネルギーを安定した状態に保つため、空いた空間には外殻電子が落ちてくるが、このときの余ったエネルギーによって特性X線（蛍光X線）が出る。蛍光X線は元素に固有なものであるため、分析する試料の含有元素を知ることができる。

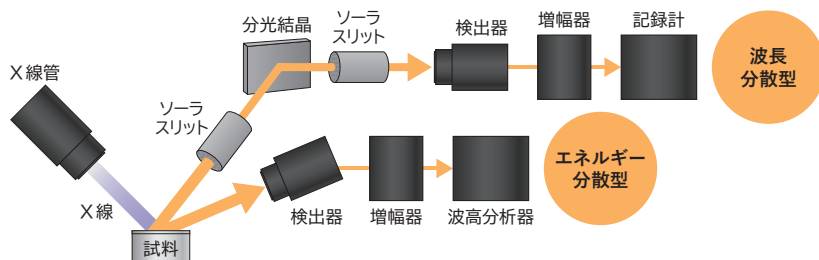


蛍光X線分析装置

蛍光X線分析装置は、波長分散型とエネルギー分散型に大別される。

波長分散型は、X線の波長に着目した手法で、蛍光X線を分光結晶によって分光し、目的の蛍光X線を検出器により選択的に計測する。

エネルギー分散型は、蛍光X線をそのまま検出器で検出できる。





地層の分析

地層の標本を作る

地層の表面を固めて、標本として残すことがあります。模様や粒の大きさなどは人によって感じ方が違うため、堆積構造や粒度の観察は主観的になりがちです。堆積物を標本として残すことによって、後から観察結果を見直したり、複数の研究者間で確かめることができます。また、標本にすることによって地層を持ち運ぶことができるため、展示や学校の授業で使用することもできるようになります。

1 地層を採取する

ジオスライサー（地層抜き取り装置）等で、地層を採取する。

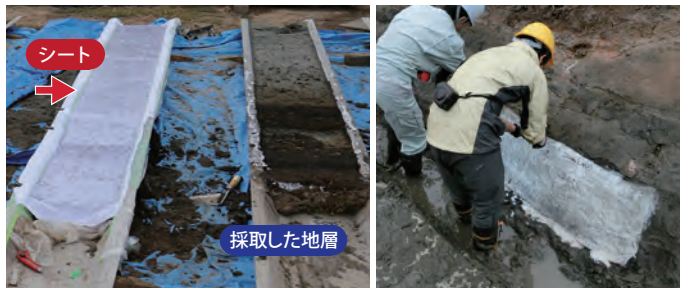


2 地層の表面を接着剤で固める

使用する接着剤は特殊な樹脂で、シートの上から流すとシートの網目を通り抜け、試料へとしみ込んでいく。



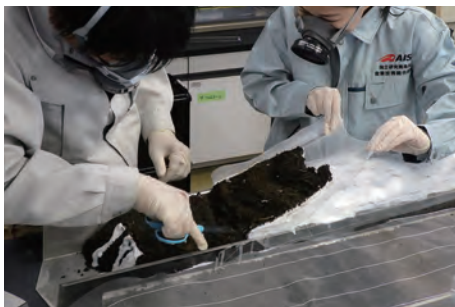
ジオスライサーで採取した地層にシートをかぶせ、シートの上から接着剤を流している様子。
(澤井, 2014
GSJ地質ニュースより)



シートは接着剤を通す網目状のものを使う。地層から直接はぎ取ることもある。

3 接着剤が乾いたらシートをはがす

接着剤が乾いたら、シートを慎重にはがしていく。シートには地層の表面がはぎ取られる。シートをはがした後に残った地層は、研究のためのいろいろな分析に使われる。

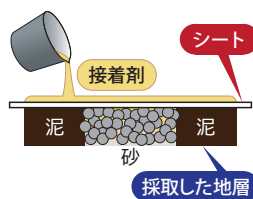


地層からシートをはがしている様子。シートには地層の表面がはぎ取られている。

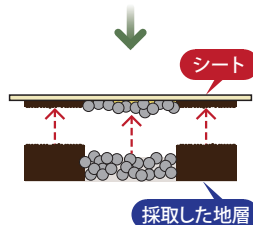


はぎ取ったシートを並べた様子。

はぎ取りのしくみ



シートの上から接着剤を流すと、砂は泥より粒が大きく、粒と粒の間に隙間ができるため、砂の層は泥の層に比べて、接着剤が奥までしみこむ。



シートをはがすと、シートには地層の表面がはぎ取られる。接着剤が多くしみこんだところは粗い砂が浮き出て見えるなど、凸凹がはっきりする。

4 はぎ取り標本を加工する

はぎ取ったシート（標本）は、用途に合わせて形を整え加工する。大型のものは博物館で展示したり、小型のものは小学校等での学習のため、貸し出すこともある。



産業技術総合研究所の地質標本館（茨城県つくば市）に展示されている標本。