

アメリカ北西部カスケーディアにおける 地震液状化痕跡のジオスライサー調査

Geoslicer surveys of liquefaction evidence in Cascadia, northwestern United States

高田圭太¹・佐竹健治²・下川浩一²
Brian Atwater³・中田 高⁴・原口 強⁵

Keita Takada¹, Kenji Satake², Koichi Shimokawa²,
Brian Atwater³, Takashi Nakata⁴ and Tsuyoshi Haraguchi⁵

Abstract: Geoslicer surveys along the Columbia River in the Cascadia subduction zone and in Seattle, Washington, revealed liquefaction features from earthquakes in the past 2,000 years. We used sheetpiles 9 m long and 0.6 m wide to obtain 10 rectangular slices. Along the Columbia River, each slice mostly consists of cross-bedded river-bottom sand interbedded with mud layers up to 2 m thick. Sills and dikes in the slices consist of massive medium sand, some of which contains angular mud clasts. Some of the beddings of the coarsest sand are convolute or oversteepened. The 1700 Cascadia earthquake is likely to have produced the highest of the intrusions. Abundant sills show that the subsurface movement of fluidized sand was largely lateral. Local vertical intrusion formed dikes observed at the surface.

Key words: Cascadia subduction zone, Columbia River, Seattle, liquefaction, fluidization, Geoslicer

1. はじめに

米国北西部の地震テクトニクスは西南日本と似ている。カスケード沈み込み帯では、ファンデフカ・プレートが北米プレートの下に沈みこんでおり、これは南海トラフでのフィリピン海プレートの沈み込みに対応する。この地域では沈み込みにもなうプレート間巨大地震、沈み込んだスラブ内で発生するやや深い地震、上部地殻内の活断層で発生する地震の3タイプの地震が発生する(第1図)。

地質学的古地震調査によって、プレート間巨大地震は過去3500年間に7回発生したことが明らかにされ(Atwater and Hemphill-Haley, 1997; Clague, 1997 など)、最新の地震が発生したのは西暦1700年1月26日であることが日本の歴史文書の津波記録から明らかにされている(Satake *et al.*, 1996)。スラブ内では、オリンピア付近の深さ60km付近で、1949年4月13日と2001年2月28日にM6.8の地震(後者はNisqually地震と呼ばれる)が発生し、被害をもたらした。シアトル市内を横切るシアトル断層では約1100年前に7mもの上下変位をとこなう大地震が発生したことが明らかにされている(Bucknam *et al.*, 1992; Sherrod *et al.*, 2000)。このように地震による地殻変動や津波の証拠は多数報告されているが、地震動そのものの証拠となる液状化痕跡は、掘削調査の困難さゆえに、ワシントン・オレゴン州境界のコロンビア

¹ 活断層研究センター NEDO 養成技術者 (NEDO fellow at Active Fault Research Center)

² 活断層研究センター (Active Fault Research Center)

³ 米国地質調査所 (U. S. Geological Survey)

⁴ 広島大学 (Hiroshima University)

⁵ 復建調査設計株式会社 (Fukken Co., Ltd.)

7月3日受付, 8月14日受理

川河岸露頭に観察される砂脈の一部が知られているに過ぎない (Atwater, 1994; Obermeier and Dickenson, 2000)。我々は 2000 年 9~10 月にコロンビア川河口付近およびシアトル郊外 (第 2 図) でジオスライサー掘削調査を行い, 地震による液状化の痕跡をとらえた。試料は約 8m の連続試料として採取し, 液状化による著しい変形構造が明瞭に観察された。本報告では, これまで十分に把握されていなかった液状化した沖積層の変形構造を記載し, その形成プロセスを検討する。

2. 調査の方法

液状化層を深部に至るまで連続的に採取し, その構造を面的に観察するために, 鋼矢板を用いたジオスライサー調査 (中田・島崎, 1997; 原口ほか, 1998) を行った。

ハンティング島周辺には潮間低地が広がり, 陸上からの資材運搬や大型重機を用いた作業は困難である。そこで, 本調査ではクレーン台船を使用し, 川からジオスライサーによる地層抜き取り作業を実施した (写真 1~3)。

調査では, 幅 = 50cm, 高さ = 15cm, 長さ = 9.0m の鋼矢板をサンプラーとして使用した。ふた板は鋼矢板にあわせて現地で製作し, 打込みに使用する油圧式高周波パイプロハンマー (American Pile driving Equipment 社製; APE50) ほか必要機材一式とともに台船に積載し, 作業をおこなった。シアトルではクレーンつきトラックを使用し, 沖積低地で陸上からのサンプリングをおこなった。

採取した試料は現場にて表面を簡易整形し, 層相を確認した後, 観察ヤードに搬入し, 詳細な観察, スケッチ, 写真撮影, 樹脂による剥ぎ取り標本の作成をおこなった。樹脂の浸透度が堆積物の粒度によって異なるため, 剥ぎ取り試料の表面は粗粒分が浮き出たように強調される。その結果, 微かな葉理やその変形を明瞭な形で観察することが可能となる。なお, 剥ぎ取り標本の作成には止水用の充填剤として使用される合成樹脂 ハイセル OH-1A (東邦化学工業) を使用した。

3. 層序と変形構造

3.1 ハンティング島 (コロンビア川)

ハンティング島周辺の 4 地点で合計 10 本 (Co-GS-1 ~ Co-GS-10) のジオスライサー調査をおこなった。

調査地点はコロンビア川の河口から約 50km 内陸に位置し, およそ 2m の潮位差がある。低潮位時に河岸に広がる潮間低地は, 風波による河岸の侵食後退で形成され, 島との間は比高約 1.5m の崖をなす。掘削地付近の現地表面の標高は約 11m, 河岸露頭で観察される西暦 1700 年当時の古土壌は現地表面下約 1m に埋没しており, 潮間低地は島の地表面より約 1.5m 低い標高約 9~9.5m に位置する。掘削はこの潮間低地上で実施した。

採取した試料は, 上部の有機質シルトを主とする潮間低地の堆積物 (Unit 1) と下部の細~中粒砂を主とする川底の砂層 (Unit 2) に区分され, それぞれ特徴的な変形構造が観察された (第 3 図, 写真 4~7)。

Unit 1 は地表から 1.5~2m にかけて堆積し, 砂質シルトを主とする有機質泥層からなる。調査地近傍で得られた試料の ^{14}C 年代から, Unit 1 は約 600~1000 年前以降に堆積したことが報告されており (Atwater, 1994), この場合, プレート境界における最新活動のひとつ前の event (900-1300 年前; Atwater and Hemphill-Haley, 1997) 以降に堆積したことになる。上部では木片・炭化物の集積が顕著に認められ, 中~下部では細粒砂が脈状, 塊状に含まれ, 極細砂と細かい互層をなし, 潮汐の影響を受けて形成されたことを示す。泥層は下流ほど厚く堆積し, 泥層間には無層理の砂層が貫入する。Unit 1 の泥層直下には無層理の細粒砂層がみとめられ, これは断片化した泥塊の偽礫を含む。

Unit 2 はコロンビア川の川底に堆積した砂層を主体とし, 水平~斜交ラミナが明瞭に発達

する。その傾斜は現在の流向と一致する。コアのうち Co-GS-1 ~ Co-GS-5 では砂層中に厚さ 20 ~ 30cm 程度の泥層をはさむ。これらの泥層は下位の砂層により削りこまれ、不規則な境界をなし、一部は断片化している。Co-GS-2 では厚さ約 40cm の泥層が砂脈により明瞭に貫かれる。また、砂層中にはラミナのまったく認められない無層理な部分が認められるほか、ラミナを変形させ、あるいは貫くように淘汰のよい無層理の砂が分布することから、砂層内部での流動変形が示唆される。

Unit 2 の深度 4.5 ~ 5.0m では、著しく変形したラミナの頂部が明瞭に切断されている。この境界の直上には無層理の中粒砂が堆積し、侵食を促すような粗粒堆積物は認められない。

3.2 シアトル郊外（ドワムシ川河岸）

ドワムシ川の河口付近において採取したコアに、液状化痕跡と思われる特異な変形が認められた(第4図,写真8~9)。地層の変形が認められたコア(Vincent metal; Du-GS-3 ~ Du-GS-6)は大きく Unit 1 ~ 3 の3つのユニットに区分される。

Unit 1 は深度約 2m の薄い黒色土壌を境として、これより上位の層準である。本層はドワムシ川河畔の浚渫造成に際してサンドポンプによってもたらされた砂層で、弱い水平堆積構造が発達する。本層の基底をなす古土壌は、西暦 1910 年代頃の地表面とされており、地震性地殻変動により沈降したものと推定されている。

Unit 2 は上記の古土壌の下位に分布する厚さ 3m 程度の砂層である。本層は細 ~ 中粒砂を主体とし、クロスラミナが卓越することから、比較的流れの緩やかな環境で堆積したと考えられる。本層中には、周囲に比べ細粒な砂で充填された幅 1 ~ 2cm、長さ 10cm 程度の生痕が多数認められる。特に Unit 2 の中部に連続的に分布することから、浅海底もしくは潮汐の影響を受ける河口付近のような環境が徐々に埋積されていったものと推定される。

Unit 3 はおおむね砂層からなり、シルトの薄層、木片・炭化物の密集層をはさむ。砂層には細 ~ 粗粒砂のフォアセット ~ 水平ラミナが卓越し、ドワムシ川の河床堆積物としての様相を呈する。本層のラミナが発達する砂層には、泥の偽礫を含む無層理の砂が貫入している(写真8,9)。ラミナが発達する砂層の下位には、無層理の砂層が塊状に分布する。これらの砂層中にとり込まれた偽礫の一部にはラミナが認められ、切断面もシャープに残ることから、堆積物の流動の際、接していた泥層が分断され、とり込まれたものと考えられる。また、Du-GS-4 では、無層理の砂層中にラミナがブロック状に残っており、その向きが回転を受けている。4本のコアでこれらの構造の深度がほぼ一致することから、同一の液状化層を多断面で観察しているものと考えられる。

シアトル郊外のコアに認められる液状化痕跡は Unit 3 に限られており、Unit 1 および 2 には顕著な液状化痕跡は認められない。この液状化痕跡がいつ形成されたかを明確に示す年代資料は得られていない。

3.3 変形構造

地震動による液状化は2つの段階に分けて考えられる(第5図)。まず、粒子間隙の多いゆるい地層(主に砂層:A)で地震動により粒子間の結合が失われ、堆積物全体が間隙水中に浮遊した状態となる(B:液状化;liquefaction)。この状態が堆積物の下部から収束し、再堆積することで、粒子間が密になり、余剰間隙水が相対的に上部に移動するため、液状化層上部に水の層が形成される(C:Owen, 1987, 大川, 1997)。そして、液状化層の上位に不透水層(泥層等)があると、間隙水圧が解放されず、流体(水の層および流体化した液状化層)が被圧する。被圧した流体と上位層との間に圧力差が生じるため、流体は弱線を通して移動し、この時に周囲の堆積物を取り込む事でシル、ダイクといった特徴的な貫入構造や脱水構造が形成される(D:流動化;fluidization)。

採取したコアに認められた変形構造を以下の4つにまとめ、主としてコロンビア川コアの変形構造を中心に記載する。

- (1) 貫入構造 (シル・ダイク)
- (2) 脱水構造 (皿状構造)
- (3) ラミナの波状変形 (convolute bedding, oversteepened cross-bedding)
- (4) ラミナの異常傾斜と切断 (断層)

(1) 貫入構造 (シル・ダイク)

砂層の貫入構造は、液状化に伴う堆積物の流動の痕跡として、コア中で最も明瞭に確認される。その形態から、水平方向に層状に広がるシルと垂直方向に脈状に貫入するダイクとに分けられる。シルは泥層 (不透水層) の直下に位置する 경우가多く、不透水層に妨げられて被圧した液状化層の側方への流動を示す。多くのシルは無層理の砂からなり、流動方向は不明確な場合が多いが、Co-Gs-2 の 3.6~4.0m では、微かな流理とマッドクラストの分布から、流動の方向が一定ではなく、対流するような流動が示唆される。

明確に認められるダイクは、下位に供給源を持ち、泥層を貫くように分布する場合で、Co-Gs-1 の 4.5~4.7m, Co-Gs-2 の 3.1~4.0m, Co-GS-3 の 0.8~1.4m, Co-GS-5 の 1.4~2.0m にみられる。いずれも上方に向かう流動の方向性が明瞭であり、近接する泥層を削り込み、マッドクラストとして取り込む。また、小規模ではあるが、Unit 2 中の薄い泥層を切る幅数 mm の砂脈も比較的明瞭である。

こうして認識される貫入構造は、ハンティング島コアでは Unit 1 直下に供給源を持つものと Unit 2 中に発達するものとは大きく 2 つに分けられる。

一方で、砂層中の層理、葉理に沿って無層理の砂層が貫入する例が認められる (たとえば Co-Gs-2, 4, 7, 9, 10 の下部)。こうした場合、貫入構造は小規模で、脱水構造やラミナの波状変形といった他の変形を伴うことが多い。また、貫入構造の中に堆積物の既存構造 (ラミナなど) がブロック状に残る場合もある (Co-Gs-9 など)。

(2) 脱水構造 (皿状構造)

皿状構造は第三紀の堆積岩中にしばしば認められ、その特異な形態のため従来から注目されてきた。辻・宮田 (1987) は水槽実験によりその形成過程を説明している。

コア中では、不明瞭ながら Co-Gs-1, 2, および、Co-Gs-9, 10 に認められる。周囲が水平~斜交ラミナをなす中で、これらのラミナは不明瞭となり、幅約 5cm のトラフ状の構造が微かに認められる。構造は周囲よりも細粒の堆積物により形成される。

(3) ラミナの波状変形 (convolute bedding, oversteepened cross-bedding)

ラミナの波状変形は、中粒砂以上の粗粒堆積物で多く認められる。この堆積物の特徴は、粒子間隙は十分にあるが、粒子自体が液状化しにくい (有効応力値が高い) ことである。このため、流動変形は起こりにくく、間隙水および細粒堆積物 (この場合液状化しやすい細~中粒砂) の流動に伴い可塑的に変形し、さまざまな形態として観察される (Lowe, 1975 など)。特徴的なものとして、複雑な波状褶曲の変形を示す convolute bedding, ラミナの立ち上りや、“く”の字状変形を示す oversteepened cross-bedding が報告されており、いずれも、フォアセットラミナ・斜交ラミナの発達する層準に認められることが多い。Lowe (1975) は、間隙水の移動 (あるいは脱水) の程度との関係から、これらの構造の発達度合を模式的に示した。

類似する変形構造として重力荷重等による変形 (load casts) が考えられるが、変形が局所的で、堆積物中に急激な荷重の変化を直接示す証拠は認められないこと、堆積物の流動や脱水構造を伴うことが、液状化による波状変形の特徴といえる (Lowe, 1975)。

コア中では、Co-Gs-4 の 4.4~5.2m に発達する convolute bedding が最も顕著で、上位層との間に明瞭な境界が認められる (写真 7)。上に向かって反り返るように変形したラミナは、その頂部で切断され、小規模な貫入を生じている (写真 7 の矢印 A)。

oversteepened cross-bedding は、bedding のユニット単位で形成される (Co-Gs-6, Co-Gs-8 など)。

Co-Gs-7 の 3.9 ~ 4.4m , Co-Gs-9 の 4.4 ~ 5.3m は葉理間に砂層の貫入が認められ、貫入層の流動に伴いラミナが変形を受けたことを示す。

(4) ラミナの異常傾斜と切断(断層)

Co-Gs-2 の 5.5m 以深に認められる。正断層によってラミナが切断され、数 cm のずれを生じ、低下方向にラミナが傾斜を増す。また、下位の泥層もこの傾斜方向に傾き下がる。断層は認められないものの、同様の異常傾斜は Co-Gs-1 にも認められる。断層が正断層センスを示すことから、何らかの理由で重力性の剪断力が働いたものと推定される。液状化および堆積物の流動に伴い、下位層準で不均等な沈下が生じ、これを解消するために生じた二次的変形と推定される。また、断層という brittle な変形を示すことから、これらの層自体は液状化していないことが示唆される。

3.4 ジオスライサーコアリングにおける変形

矢板の打込み作業に際して生じる変形としては、矢板に接する面の引きずりとコアの短縮が考えられる。

観察面では、矢板(サンプラー)の継ぎ手に接する数 cm 内に鉛直下方に向かう引きずりが認められた。この引きずりは打込み時に矢板が傾くことにより形成されるもので、作業時に注意することで大部分解消される。

一方、コアの短縮は、ふた板打込み時に内部に取り込んだコアを押し下げることにより生じている。コロンビア川コアでは、ふた板打込み時のコア短縮量は 20 ~ 50cm であった(第 1 表)。実際に短縮しているのがどの部分かを特定することはできない。仮に短縮により堆積物中の水分が押し出されるとすると、3 ~ 5 リットルの水量に相当する。

4. 考察 - 堆積物の流動と液状化層の形成プロセス -

コアの表面に認められる変形は、矢板に接する部分のわずかな引きずりを別とすれば、大半が地震動に伴う液状化によって形成されたものと考えられる。

ハンティング島における液状化痕跡は少なくとも西暦 1700 年時点の地表から深さ約 7m まで認められ、泥層に貫入するか、もしくは砂層中で流動化することでその痕跡を残している。Unit 1 の泥層中の ^{14}C 年代がほぼ最新活動に先立つ event 以降を示すことから、少なくとも Unit 1 に認められる液状化痕跡は 1700 年地震によって引き起こされたと考えられる。また、Unit 2 以深の液状化痕跡には、1700 年以前の地震による痕跡が含まれる可能性もある。コアの下部から最上部の泥層までを一気に貫くような痕跡は認められないことから、液状化層の供給源は 1 層ではなく、複数の層準で液状化がおこったと推定される。

液状化に伴う堆積物の流動は、過剰間隙水圧の解放に伴って生じ、側方への流動は、この流れが泥層等のキャップにより妨げられることで生じる。本地域で小規模なシルが多数認められるのは、コロンビア川の河川堆積物中に何枚もの泥層が薄く挟まれているためと考えられる。地表・露頭に明瞭なダイクが認められない地点でも、地下にはシルが発達している(第 6 図)ことから、シルとして側方に流動した液状化層の一部は、コロンビア川に流れ込むことで圧力を解放したものと考えられる。この過程で、水平方向に発達するシルを境界として河岸の水平拡張(lateral spreading)が生じた可能性も指摘されている(Atwater *et al.*, 2001)。

シアトルコアにおけるダイクの形状は、上方に凸となっており、外縁に薄くシルトを伴い、含まれるクラストの断面が新鮮で円磨をほとんど受けていない。これらの状況は、観察されたダイクが液状化層の末端に位置しており、流動の継続時間がそれほど長くなかったことを示唆する。これが事実であれば、地震の規模を推定する上で重要であると考えられる。沈み込み帯における調査地点の位置から(第 1 図)、シアトルコアの液状化痕跡は、シアトル断層の活動もしくはスラブ内地震により引き起こされたものと推定される。

5. まとめ

本調査により以下の各点が明らかとなった。

- ・ハンティング島周辺における地下約 8m の堆積物は，上部の砂質シルトからなる潮間低地の堆積物 (Unit 1) と下部のコロンビア川の川底堆積物 (Unit 2) に区分される。
- ・シアトル郊外ドワムシ川河口付近における地下約 8m の堆積物は，上位より，浚渫砂層 (Unit 1)，生痕化石の残る浅海性砂層 (Unit 2)，液状化層が明瞭で炭化物を多く含む河川性堆積物の Unit 3 に分けられる。
- ・コロンビア川における液状化の痕跡は，貫入構造 (シル・ダイク)，ラミナの波状変形として地下およそ 7m まで認められ，これまで考えられていたよりも深い地点にまでその供給源が推定される。
- ・液状化層は異なる深度に分布しており，複数の層準が同時に液状化したことが示唆される。
- ・シルの一部は側方に向かう流動によってコロンビア川に流入し，間隙水圧を解放した可能性がある。地表に達するダイクの形成を規定するのは地震動の強さのみではなく，間隙水圧を解放する経路の選択にも依存することが示唆される。
- ・シル・ダイクの中には流動によって形成された流理が残るものがある。流理とマッドクラストの分布から，シルの中では流動の方向は一定ではなく，対流するような方向を示すものもある。
- ・ジオスライサ - は，地下水面下あるいは水面下の掘削調査において，幅の広い，明瞭な地層断面を得ることができ，含水率の高い未固結堆積物調査に非常に有効である。

今後，液状化層の粒度特性を明らかにし，液状化層とその周囲の地層の ^{14}C 年代測定をおこなうことにより，地層の形成年代および液状化の発生日代を明らかにする必要がある。また，液状化痕跡の空間的分布や S 波速度・N 値等，液状化発生に関係するとされている地盤情報と照らしあわせ，コロンビア川流域の 1700 年地震による強震動分布，地震規模を推定する必要がある。一方，シアトルコアにみとめられた液状化痕跡の地域的な分布を明らかにし，原因となった地震についても検討する必要がある。

なお，本調査は平成 12 年度科学技術振興調整費国際共同研究「地震被害軽減のための地震発生ポテンシャルの定量化に関する日米共同研究」の一部として，地質調査所 (現産業技術総合研究所活断層研究センター) と米国地質調査所 (U.S.G.S) との共同研究として実施された。

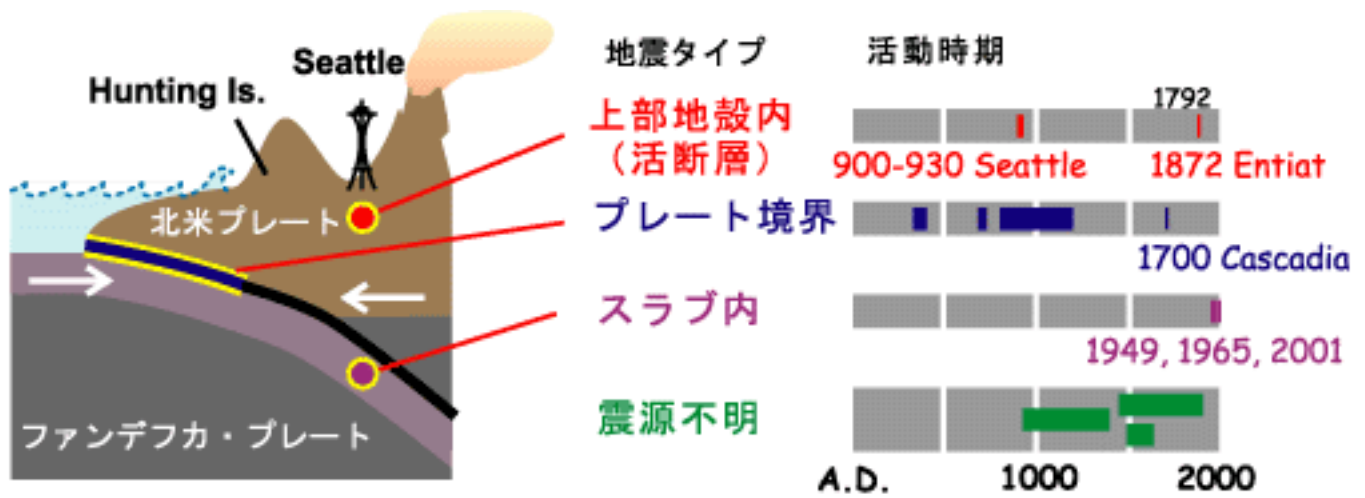
文 献

- Atwater, B. (1994) Geology of Holocene liquefaction features along the lower Columbia River at Marsh, Brush, Price, Hunting, and Wallace Islands, Oregon and Washington. *U.S. Geol. Surv. Open-File Rep.*, 94-209, 64p.
- Atwater, B. and E. Hemphill-Haley (1997) Recurrence intervals for great earthquakes of the past 3500 years at Northeastern Willapa bay, Washington. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1576, 108p.
- Atwater, B., K. Burrell, M. Cisternas, B. Higman, W. Barnhardt, R. Kayen, D. Minasian, K. Satake, K. Shimokawa, T. Haraguchi, K. Takada, D. Baker and T. Nakata (2001) Japanese slicer explores geology of liquefaction from the 1700 Cascadia earthquake. *EOS*, Submitted.
- Bucknam, R., E. Hemphill-Haley and E. Leopold (1992) Abrupt uplift within the past 1700 years at Southern Puget Sound, Washington. *Science*, **258**, 1611-1614.
- Clague, J. (1997) Evidence for large earthquakes at the Cascadia subduction zone. *Rev. of Geoph.*, **35**, 439-460.
- 原口 強・島崎邦彦・小島圭二・中田 高 (1998) 地層抜き取り装置による軟弱地盤における定方位連続地層採取法。地盤工学会誌, **46**, 24-26。

- Lowe, D. (1975) Water escape structures in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, **22**, 157-204.
- 中田 高・島崎邦彦 (1997) 活断層研究のための地層抜き取り装置 (Geo-slicer). *地学雑誌*, **106**, 59-69 .
- Obermeier, S. F. and S. E. Dickenson (2000) Liquefaction evidence for the strength of ground motions resulting from late Holocene Cascadia subduction earthquakes, with emphasis on the event of 1700 A.D. *Bull. Seis. Soc. Am.*, **90**, 876-896.
- 大川秀雄 (1997) 液状化発生のメカニズムを考える . 土木学会論文集 , no. 568, 13-20 .
- Owen, G. (1987) Deformation processes in unconsolidated sands. In deformation of sediments and sedimentary rocks, edited by M.E. Jones and R.M.F. Preston. *Geological Society special publication*, **29**, Blackwell, Oxford, 11-24.
- Satake, K., K. Shimazaki, Y. Tsuji, and K. Ueda (1996) Time and size of a giant earthquake in Cascadia inferred from Japanese tsunami record of January 1700. *Nature*, **379**, 246-249.
- Sherrod, B., R. Bucknam and E. Leopold (2000) Holocene relative sea level changes along the Seattle fault at Restoration Point, Washington. *Quaternary Research*, **54**, 384-393.
- 辻 隆司・宮田雄一郎 (1987) 砂岩層中にみられる流動化・液状化による変形構造 - 宮崎県日南層群の例と実験的研究 - . *地質学雑誌*, **93**, 791-808 .

成果の公表

- 佐竹健治・下川浩一・原口 強・高田圭太・Brian Atwater・中田 高 (2001) 1700年カスケード地震による液状化痕跡のジオスライサー掘削 . 地球惑星科学関連学会 2001年合同大会予稿集 , Jm-P002 .
- Atwater, B., K. Burrell, M. Cisternas, B. Higman, W. Barnhardt, R. Kayen, D. Minasian, K. Satake, K. Shimokawa, T. Haraguchi, K. Takada, D. Baker and T. Nakata (2001) Japanese slicer explores geology of liquefaction from the 1700 Cascadia earthquake. *EOS*, Submitted.



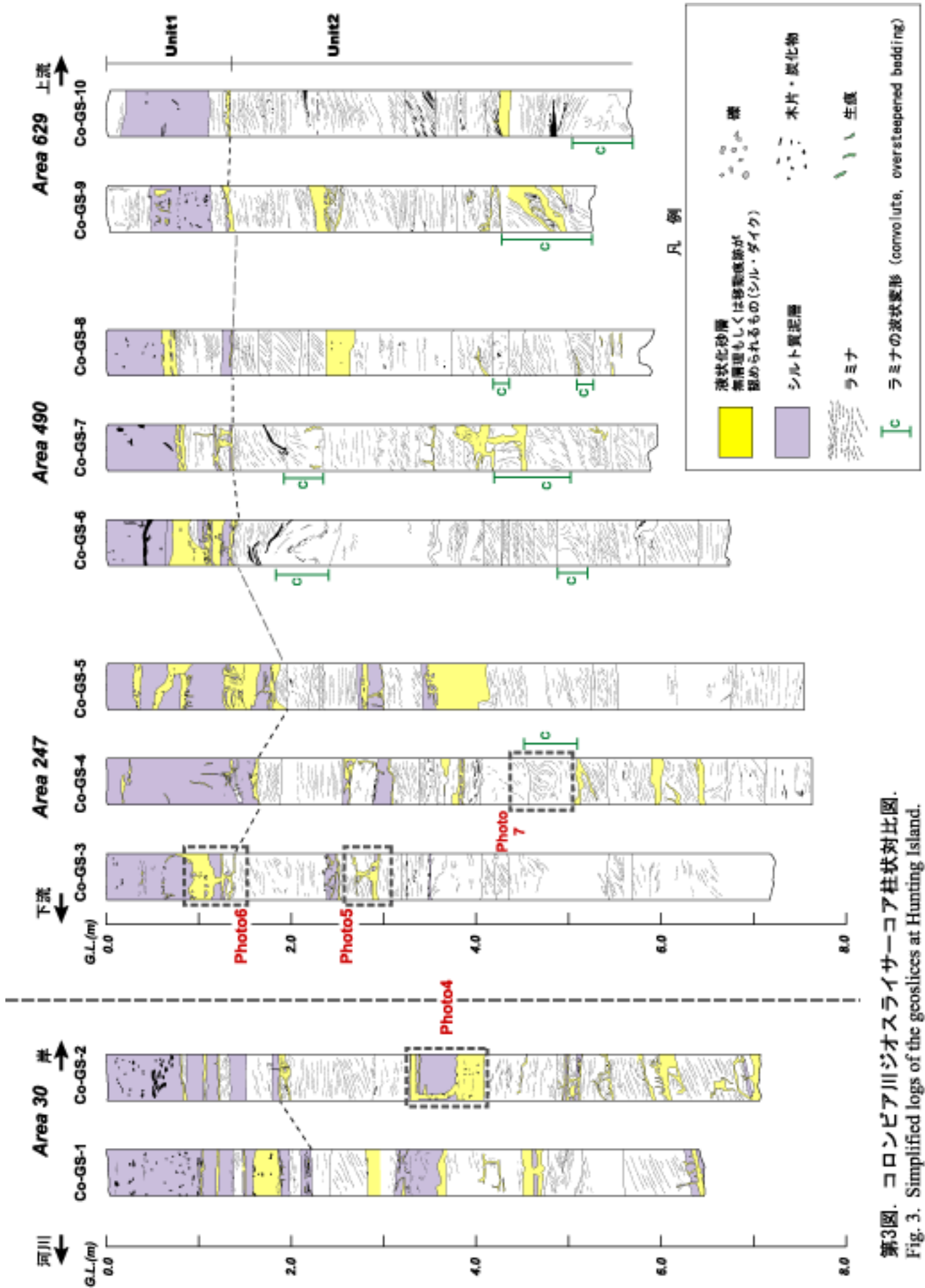
第1図. 沈み込み帯で発生する3タイプの地震と発生時期.

Fig. 1. Three generalized history of earthquakes at Cascadia subduction zone, and their inferred history in the past 2000 years. Geologic methods of red and blue events are probably incomplete.

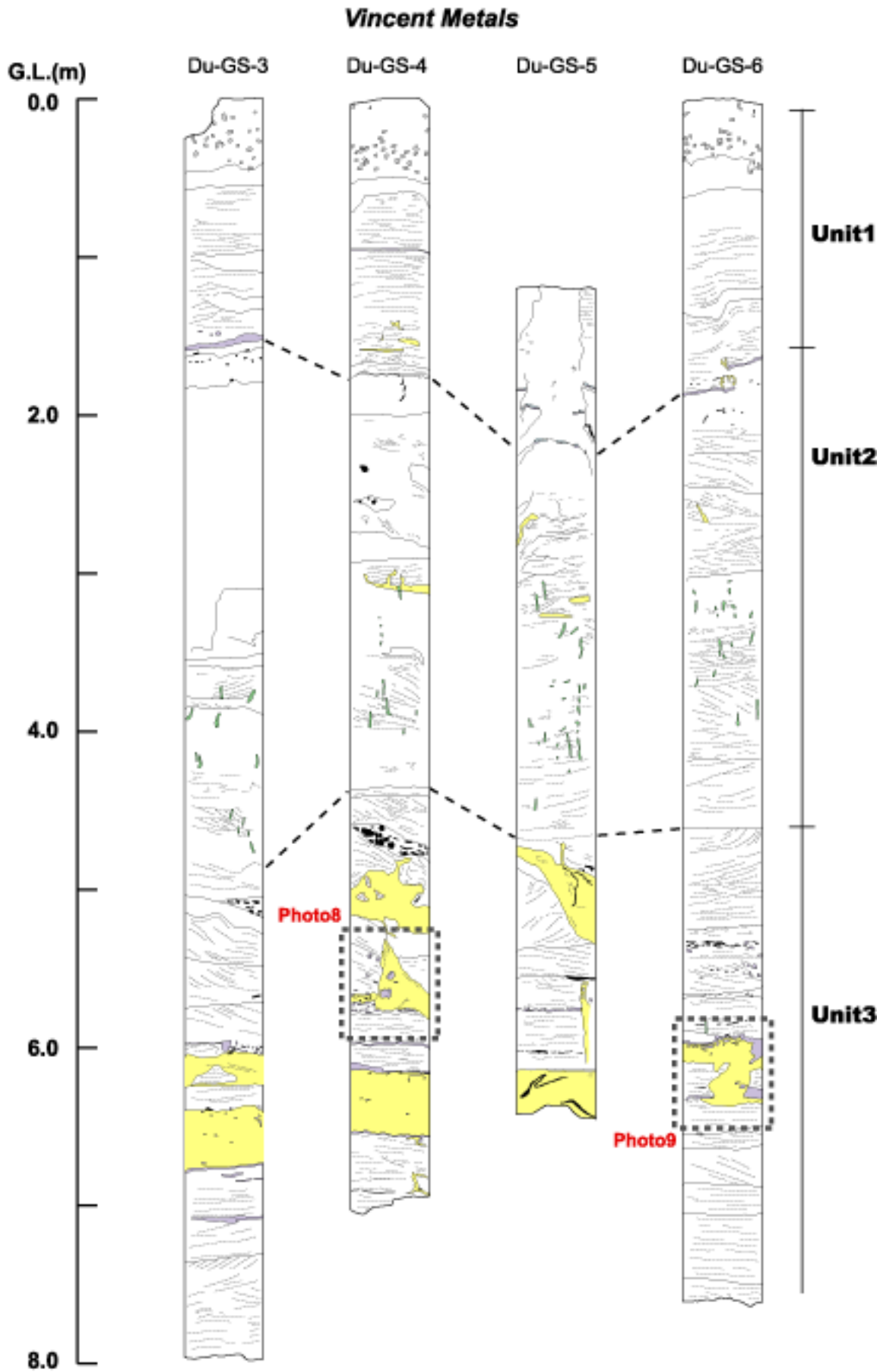


第2図. 調査対象地域位置図.

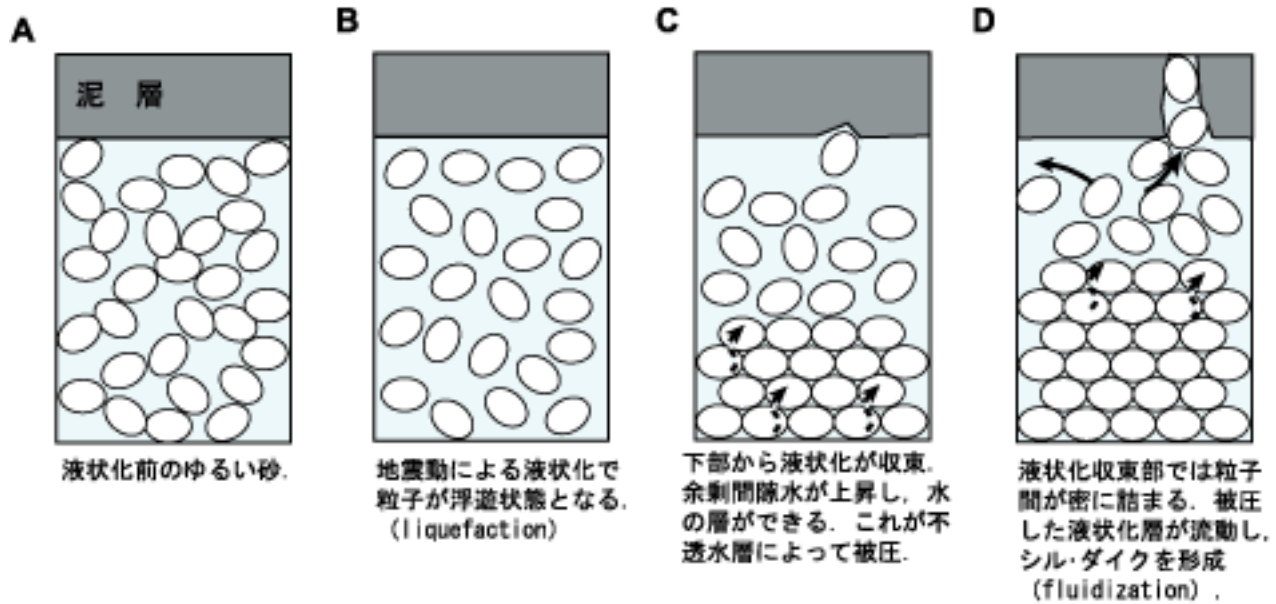
Fig. 2. Index map of the survey sites.



第3図. コロンビア川ジオスライサーコア柱状対比図.
Fig. 3. Simplified logs of the geoslices at Hunting Island.

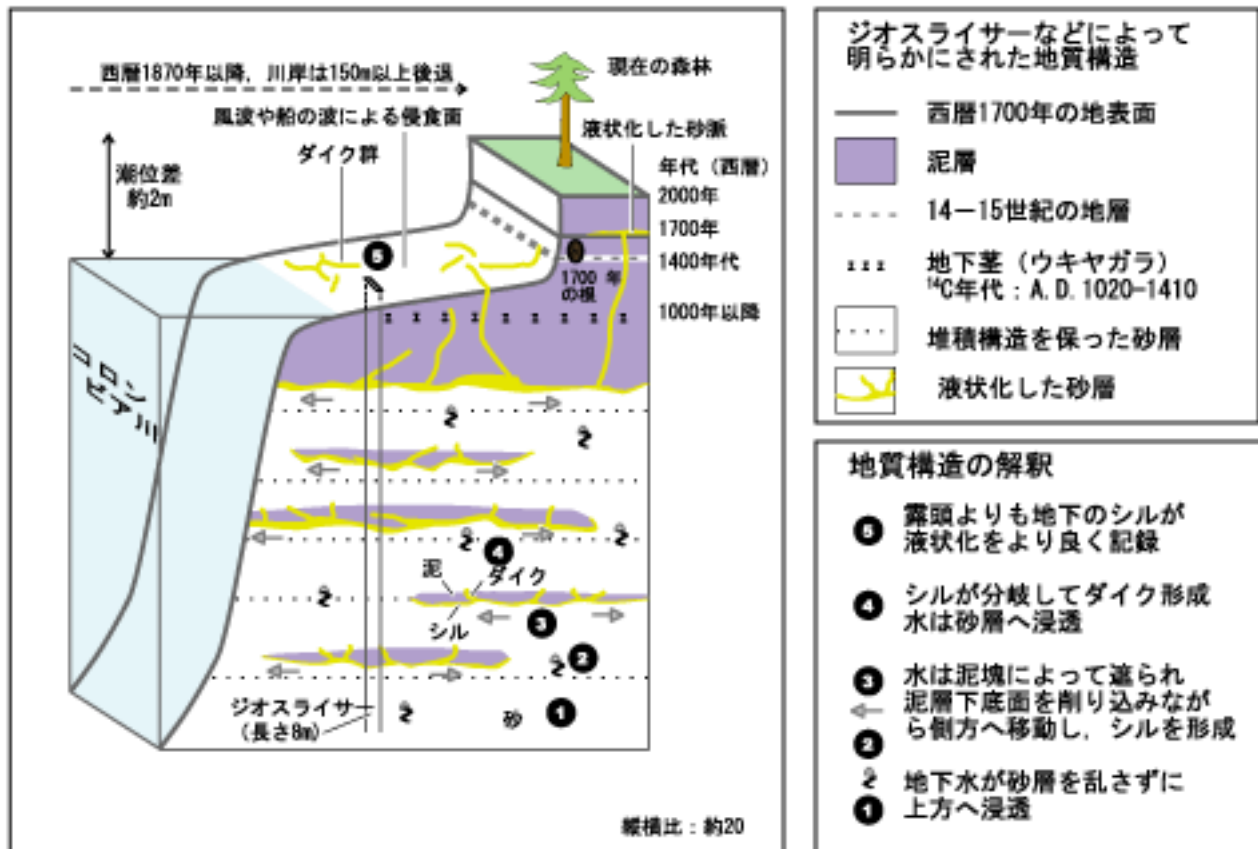


第4図. シアトル地区ジオスライサーコア柱状対比図.
Fig. 4. Generalized logs of the geoslices at a site in Seattle.



第5図. 液状化過程の模式図.

Fig. 5. Inferred mechanisms of liquefaction and fluidization.



第6図. コロンビア川模式地質断面図.

Fig. 6 Schematic view of the Columbia River site.

第1表．ジオスライサ - コア（コロンビア川）の短縮量．

Table 1. Shortening of the Geoslicer cores at Columbia River site.

コアNo.	蓋板打込み後の短縮量* (m)
Co-GS-1	0.2
Co-GS-2	0.45
Co-GS-3	0.6
Co-GS-4	0.43
Co-GS-5	0.4
Co-GS-6	0.4
Co-GS-7	0.51
Co-GS-8	0.26
Co-GS-9	0.46
Co-GS-10	0.38

*ジオスライサ - 本体打込み時にはコアの短縮はないものとし，ふた打込みによってサンプラー内の堆積物上面高度が沈下した量によって計測．計測にはオートレベルを用いた．



写真1. サンプラー(鋼矢板) 打込み作業.
Photo 1. Driving the Geoslicer (sheet pile).



写真2. ジオスライサーふた板打込み作業 (Co-GS-4) .
Photo 2. Driving the shutter plate along the sheet pile Photo by Bill Waguer, Longview Daily News.



写真3. ジオスライサー引き抜き作業 (Co-GS-3) .
Photo 3. Pulling out the sheetpile and shutter plate, which are bolted together at top.

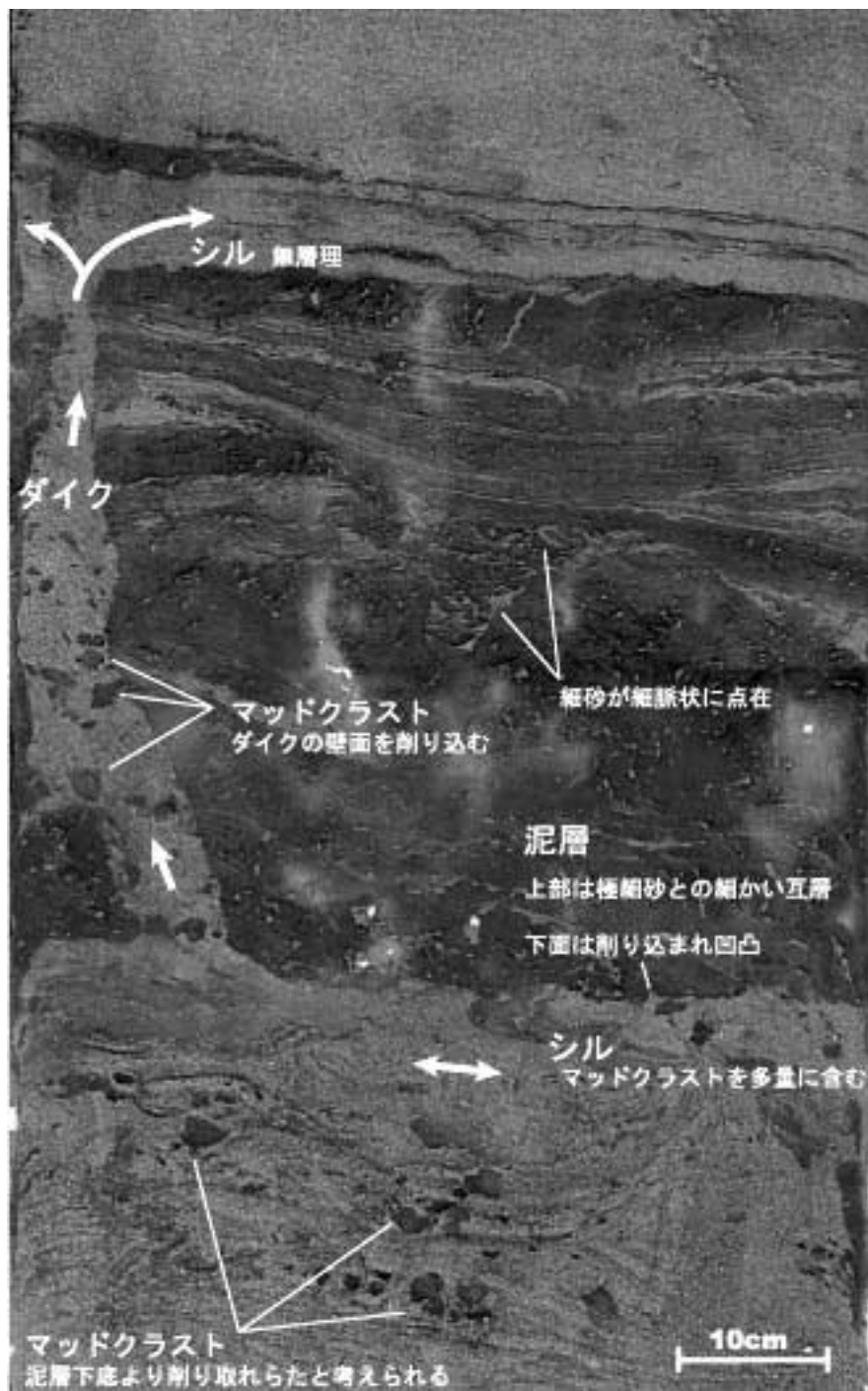


写真4. 泥層を貫くダイクと取り込まれたマッドクラスト。
Photo 4. Sand dike with clasts, seen in the peel of Co-GS-2 at 3.1-4.0 m.
ダイクの給源となるシルには断続的な方向性を持たない流理が発達。
(Co-GS-2: 3.1~4.0m剥ぎ取り)

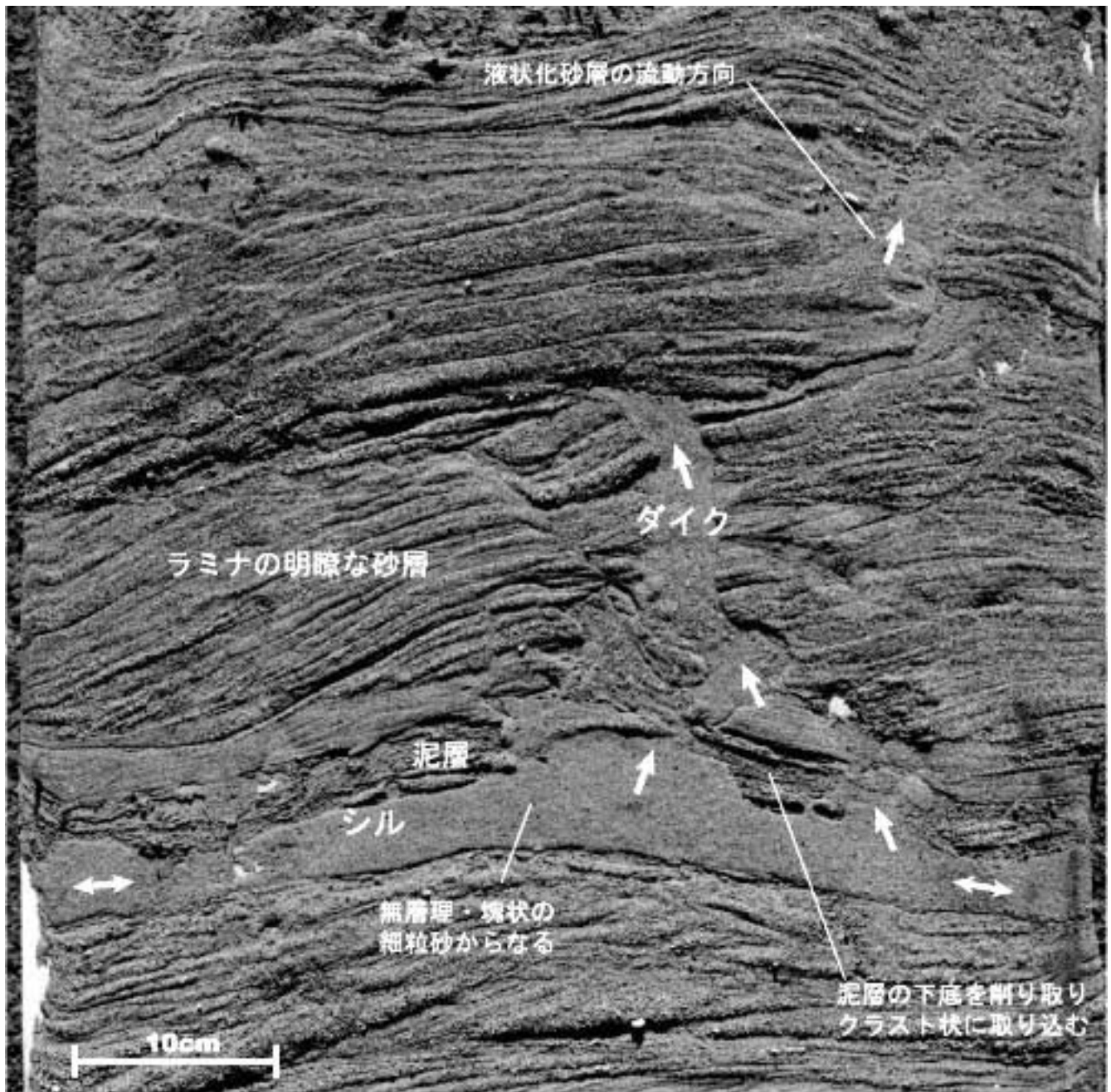


写真5. 泥層を貫き、砂層中に貫入するダイクおよびシルの形態と液状化層の流動。

Photo 5. Sills and dikes Co-GS-3: 2.6-3.1 m.

ダイク・シルの流動方向は砂層中の細粒部分に選択的に認められる。流動が粒度により規定された可能性を示唆する。(Co-GS-3: 2.6~3.1m)

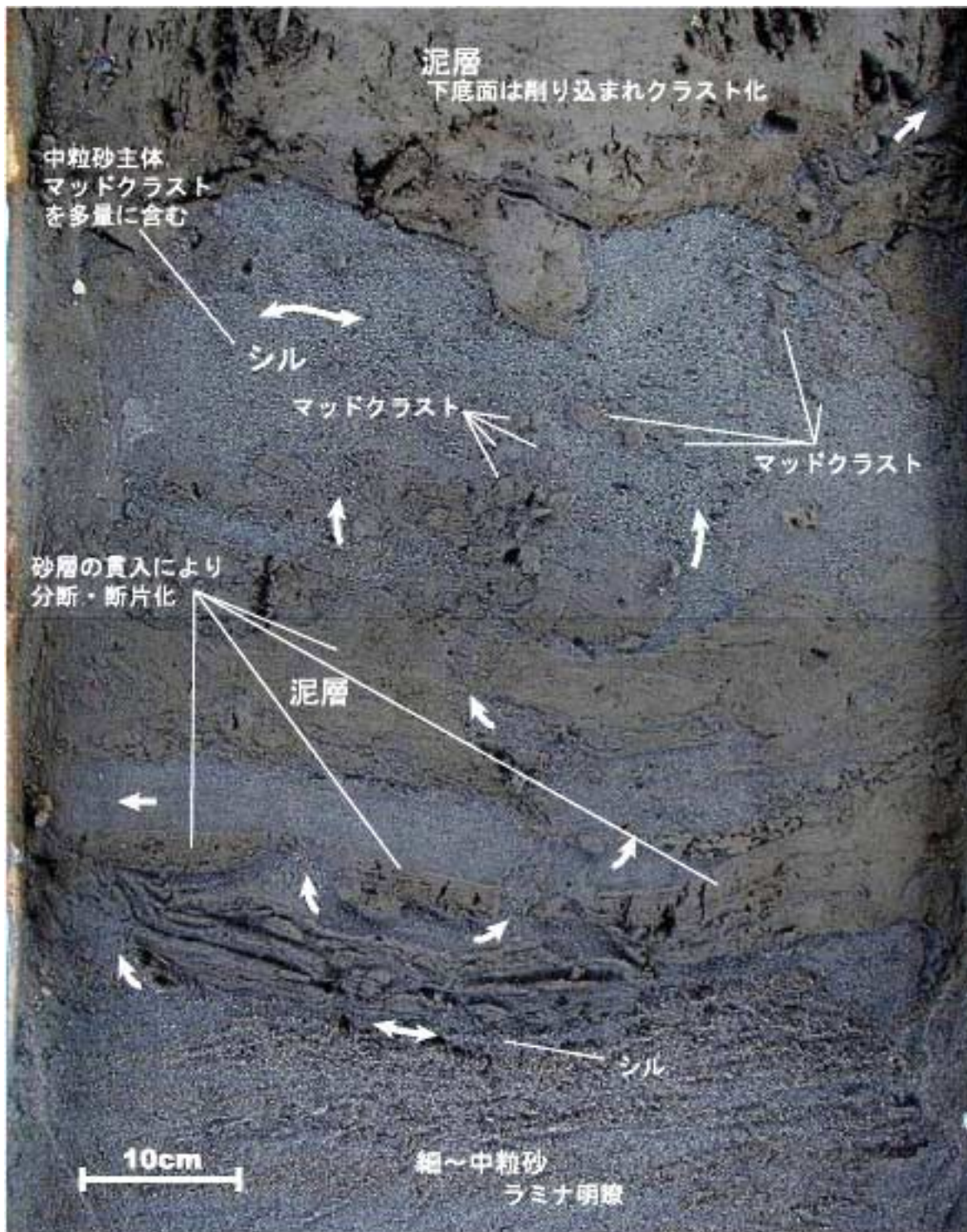


写真6. 液状化層の流動とマッドクラストの生成.

Photo 6. Intrusion with clasts eroded from the bottom of the mud layer

マッドキャップの下底を削り込み貫入する液状化層。移動の過程で取り込んだマッドクラストが砂層中に多量に認められる。断片化した泥層はめくれ上がるように上向きに変形し、クラストも噴き上げられている。(Co-6S-3: 0.8~1.4m)

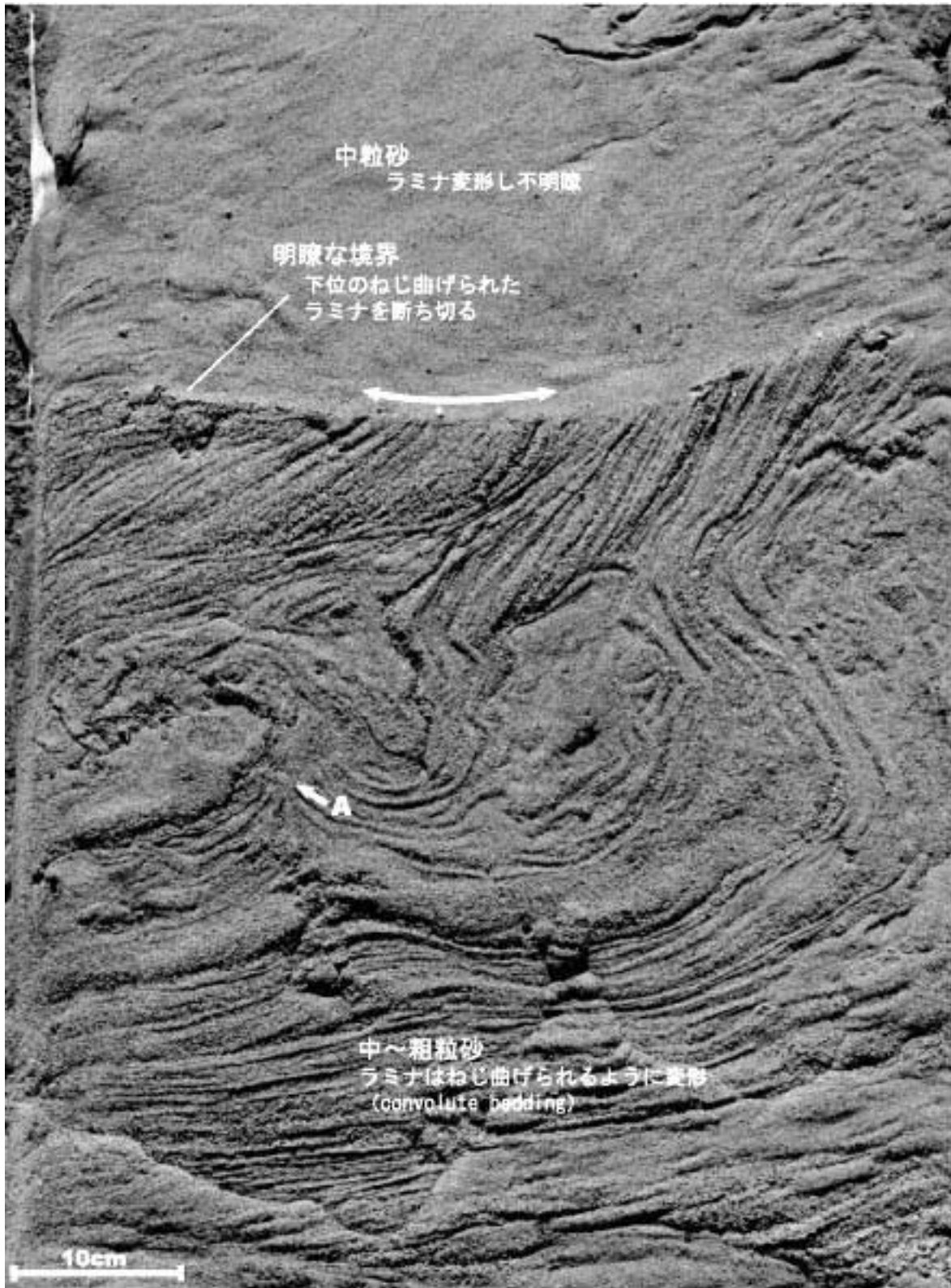


写真7. Convolute beddingとシルの明瞭な境界。

Photo 7. Convolute bedding truncated by inferred fault that may be the sole of a lateral spread.

液状化によりねじ曲げられるように変形したラミナ (convolute bedding) とこれを断ち切る境界。境界を境に上位は無層理の中粒砂からなり、側方への流動層 (シル) を形成する。矢印 (A) では、上向きに反り返るように変形したラミナが切断され、小規模な貫入を生じる。

(Co-GS-4: 4.4~5.2m)

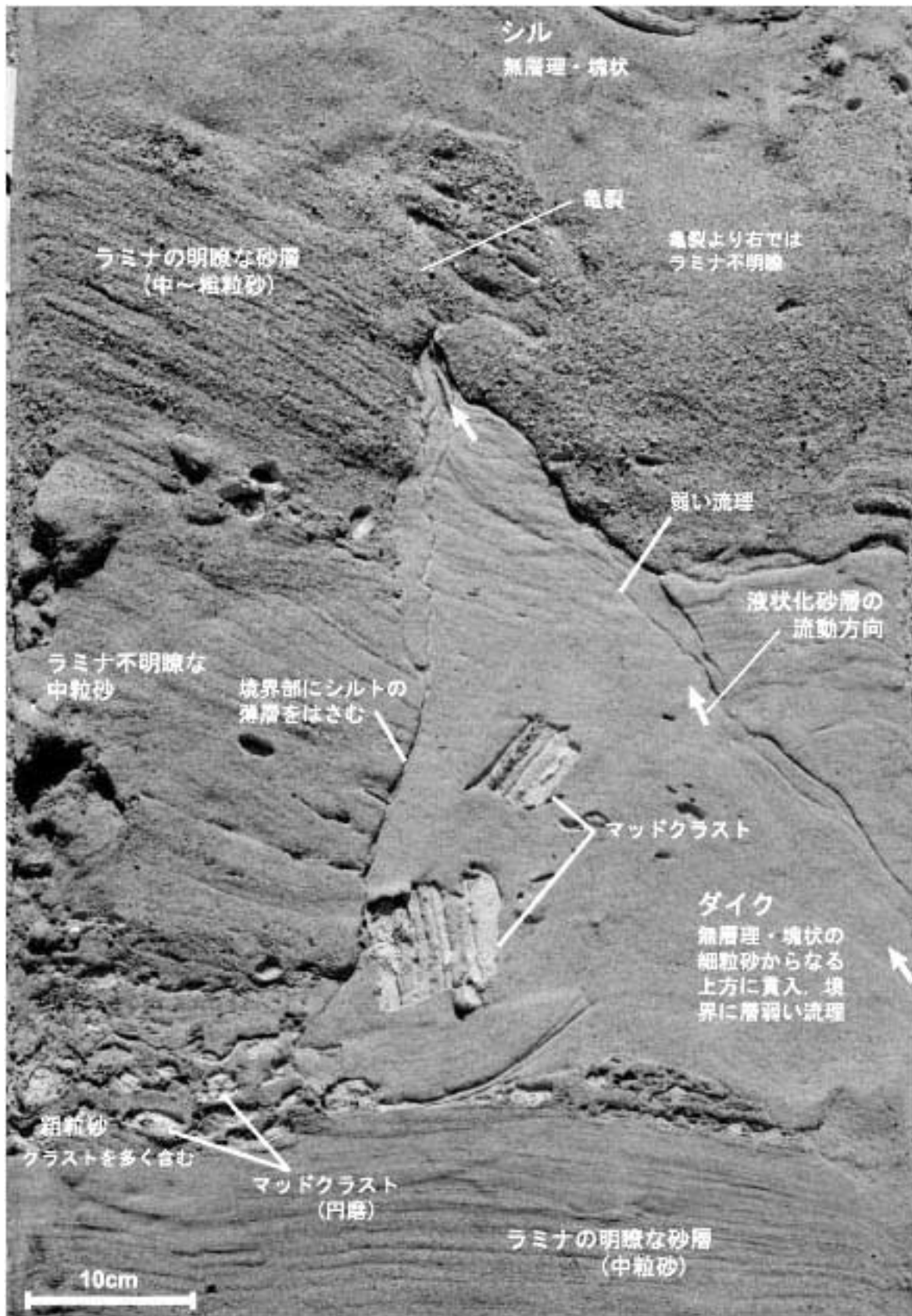


写真8. ラミナの明瞭な砂層に貫入するダイク。

Photo 8. Sand intrusion containing laminated clasts and flow bouding.

ダイクには堆積構造の残るマッドクラストがとり込まれている。ダイクの頂点の延長には亀裂が上方のシルに連続。ダイクの外縁、基底はシルトの薄層をはさみ、流動による流理をなす。

(Du-GS-4: 5.1~5.9m)

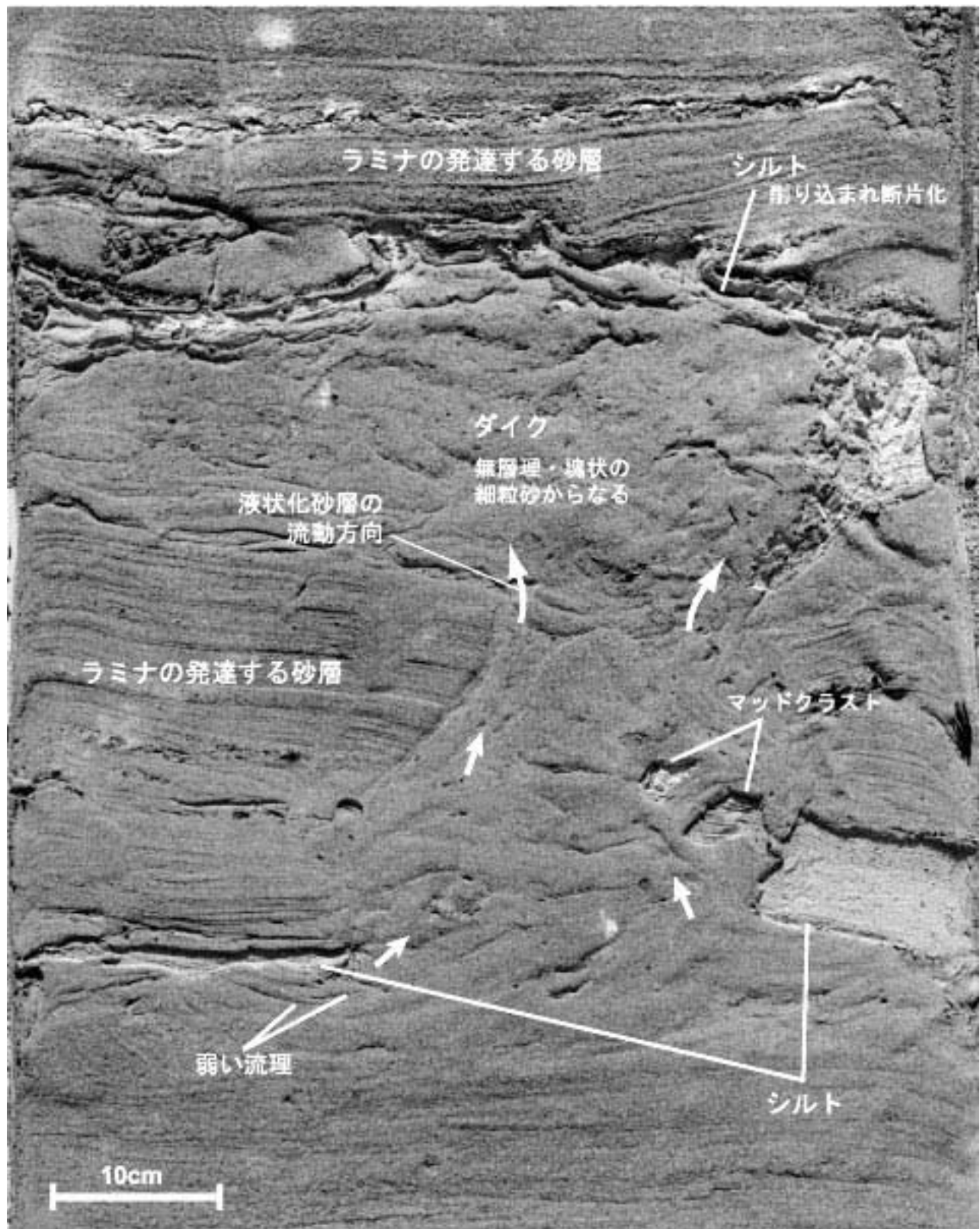


写真9. 泥層を分断してとり込み、ラミナの発達する砂層に貫入する液状化層。
Photo 9. Complex intrusion into laminated deposits.
上位の泥層下底を削り込む。Du-GS-6 (5.8~6.5m)