

米国ニューマドリッド地震帯における地震液状化層の調査

Geoslices of sand blows and their potential source beds at the New Madrid seismic zone, central United States

高田圭太¹・佐竹健治²・下川浩一³・奥村晃史⁴・Eugene Schweig⁵
Brian Atwater⁶・Laurel Mayrose⁷・Martitia Tuttle⁸・原口 強⁹

Keita Takada¹, Kenji Satake², Koichi Shimokawa³, Koji Okumura⁴, Eugene Schweig⁵,
Brian Atwater⁶, Laurel Mayrose⁷, Martitia Tuttle⁸ and Tsuyoshi Haraguchi⁹

¹元活断層研究センターNEDO 養成技術者, 現所属: 復建調査設計株式会社 (Former NEDO fellow at Active Fault Research Center, GSJ/AIST, present affiliation: Fukken Co. Ltd., takada@fukken.co.jp)

^{2,3}活断層研究センター (Active Fault Research Center, GSJ/AIST, kenji.satake@aist.go.jp, k.shimokawa@aist.go.jp)

⁴広島大学大学院文学研究科 (Hiroshima Univ., kojiok@hiroshima-u.ac.jp)

^{5,6}米国地質調査所 (U.S. Geological Survey, schweig@ceri.memphis.edu, atwater@u.washington.edu)

⁷メンフィス大学 (The University of Memphis, lmayrose@memphis.edu)

⁸M. Tuttle & Associates (M. Tuttle & Associates, mptuttle@erols.com)

⁹復建調査設計株式会社 (Fukken Co. Ltd., haraguchi@fukken.co.jp)

Abstract: A US-Japan team made geoslicer surveys of liquefaction features in the New Madrid seismic zone of the central United States in the fall of 2001, with hopes of improving methods for estimating ground motions from historic and prehistoric earthquakes. Large earthquakes occurred on December 16 (twice), 1811, and on January 23 and February 7, 1812 at the New Madrid seismic zone. Ground shaking from these earthquakes, which were felt as far away as on the Atlantic coast and Gulf of Mexico, produced thousands of sand blows on floodplains of the Mississippi River and nearby streams in an area at least 80 km by 200 km. Prehistoric sand blows, recognized in part by stratigraphic relations with Native American horizons and features, show that earthquake sequences produced similar liquefaction fields in this area about A.D. 800-1000 and 1300-1600. The geoslicing was done at two sites near Blytheville, Arkansas (sites JP and HF). A trench at the JP site, excavated by USGS and the University of Memphis, showed a sand blow of fine to medium sand with many mud clasts. On the ditch wall at the HF site, a sand blow intrudes a paleosol containing artifacts about 1 m below the surface, and almost reaches the ground surface. Using long and wide slicers, we extracted soil sections including liquefaction features. The stratigraphy in the slices at each site shows that the sand blows came from depths of 7 m or more. A sand blow on the ditch wall (HF site) continues to a dike observed in the slice 4 m beneath. Detrital wood in the highest potential source sand beneath the JP site gave radiocarbon ages corresponding to A.D. 970-1190 and A.D. 1000-1170. These ages show that the sand was shaken not only in 1811-1812 but perhaps also during the earthquake sequence of A.D. 800-1000.

キーワード: ニューマドリッド地震帯, 液状化, 噴砂, 古地震, ジオスライサー

Keywords: New Madrid seismic zone, liquefaction, sand blow, paleoseismology, geoslicer

1. はじめに

活断層研究センターは, 地震液状化層の構造を明らかにし, 地震規模との関係を調べるため, 米国地質調査所 (以下 USGS) およびメンフィス大学 (以下 UM) の研究者らと共同で, 米国ニューマドリッド地震帯においてジオスライサーを用いた地層抜き取り調査を実施した. その結果, 地表に認められる噴砂跡とその給源となった液状化層との関係が明らかになった.

2. ニューマドリッド地震帯の概要

ニューマドリッド地震帯 (New Madrid seismic zone) は, 米国ミズーリ, アーカンソー, テネシー, ケンタッキー, イリノイの 5 州にわたって広がり, ロッキー山脈以東で最も活動的な地震帯を形成している. 地震帯が位置するミシシッピ川河谷北部一帯は, リールフット地溝 (Reelfoot rift) と呼ばれる地溝をなし, 白亜紀以降の堆積物が厚く堆積している. ミシシッピ川およびその支流に沿っては, この堆積物を覆って, 更新世後期のアウトウォッシュ堆積物,

完新世の河川の氾濫堆積物や後背湿地性の堆積物が広く分布している (Obermeier, 1989)。

この地震帯を震央として、西暦 1811 年 12 月 16 日 (2 回)、1812 年 1 月 23 日、2 月 7 日にそれぞれ M_s ~ 7.5 の地震が発生した。この一連の地震は、遠くメキシコ湾岸やアメリカ東海岸地域でも有感であった。微小地震の観測により、断層帯中央部に位置する以下の 3 条の断層がこれらの地震の震源になったと考えられている。(1) マークツリー (Marked Tree, Ark.) からカルサースビル (Caruthersville, Mo.) にかけて、約 100km の長さで地溝の中心付近に分布する北東-南西走向の断層。(2) リッジリー (Ridgely, Tenn.) からニューマドリッド (New Madrid, Mo.) の西にかけて、北北西-南南東走向で分布する、より地震活動が活発な地域。(3) ニューマドリッドの西からチャールストン (Charleston, Mo.) にかけて、北東-南西走向で分布する比較的短い断層。(1)と(3)は、杉の字状に雁行しており、右横ずれの卓越する活動を示す。この 2 断層をつなぐように分布する(2)は、圧縮場に生じたスラストであると考えられている (Obermeier, 1989)。このスラストに沿って、1811 年ニューマドリッド地震の際に地殻変動が生じ、ミシシッピ川の流路が変わったとされているが、地表地震断層は現れなかった (Fig. 1A)。

ニューマドリッド地震の際には、ミシシッピ川の氾濫原において液状化現象が広く発生したことが知られており、これを用いた古地震学的研究や地震規模の推定が盛んに行われている (Tuttle *et al.*, 1998, 2000; Tuttle and Schweig, 1995; Obermeier, 1996, Obermeier and Pond, 1999)。本地域では、当時地表に噴出した大量の砂が耕作土層直下に分布する。このため、空中写真では、色調の違いとして、その分布を明瞭に認めることができる (Fig. 1B)。

USGS などによる古地震学的調査によって、西暦 1811-12 年のほかにも西暦 1450 年頃、900 年頃、さらにおそらく 500 年頃にも似たような地震が発生したと推定されている (Atkinson *et al.*, 2000; Schweig and Ellis, 1994; Johnston and Nava, 1985)。

3. 調査地点周辺の地形およびトレンチ調査の概要

調査地点であるアーカンソー州ブライビル (Blytheville) は、ニューマドリッド地震帯の中心付近に位置する。大きく蛇行しながら流下するミシシッピ川とその支流によって形成された広大な氾濫原が広がり、現流路および旧流路に沿って比高数 m の自然堤防帯がなだらかな微高地列を形成する。

調査地点は、ブライビルの北部ヤープロー (Yarbro) 地区に位置する小河川 (Pemiscot Bayou) 沿いのため池跡 (Joe's Pond, 略して JP サイト)、およびこの南西約 500m に位置する綿花畑内 (Haynes Field, 略して HF サイト) の農業用排水路とした (Fig. 1B)。

3.1 JP サイトの状況とトレンチの概要

JP サイトは、幅約 30m、長さ約 150m の東西に長い人工のため池で、現在は使用されていないため、導水されていない。この池の中心部付近には、ほぼ東西に延びる噴砂列が分布している。USGS および UM は 2001 年 10 月に、噴砂の構造を観察するためのトレンチ調査を実施した。トレンチは、ほぼ南北に長さ約 10m、幅約 2m、深さ約 1.5m の規模で、壁面はほぼ垂直に保たれている。トレンチの壁面では、地表付近のシルト層が陥没し、噴砂が椀状に堆積する構造が観察された (Fig. 4)。噴砂は淘汰のよい細~中粒砂によって構成され、多量のマッドクラスト (mud clast) を含む。噴砂の量に比べ、トレンチの壁面で観察されるダイク (dike) の幅は数 cm 程度と非常に狭い。

3.2 HF サイトの状況と水路壁に観察される噴砂構造

HF サイトは、綿花畑の間にある排水路 (ditch) を使用した。排水路は、幅約 2m、深さ 1m ほどであるが、調査に際してこの一部を掘り下げ、幅約 2m、深さ約 2m の壁面を整形し、地表付近の噴砂構造を観察した。現地表から約 1m の深度に、先住民の遺物を含む古土壌層が分布しており、噴砂はこの古土壌層を破壊して、地表近くまで達している。古土壌の下位にはミシシッピ川の氾濫によって堆積したシルト~細粒砂が、正級化を示して幾重にも互層する。壁面に観察される構造は、JP サイトと同様に椀状の形態をなし、無層理・塊状の粗粒砂および砂質シルトによって充填される。これらの充填堆積物は多量のマッドクラストを含み、周囲の氾濫堆積物を削り込んで堆積したと推定される。噴砂は、明瞭な境界を持って粒度構成が変化しており、時間間隙をおいた何回かの噴砂現象によって 1 つの構造が形成されたことが示唆される。

4. 調査方法および掘削位置

ジオスライサー調査は、中田・島崎 (1997) および原口ほか (1998) に基づいて作業を行い、サンプルボックスとして幅 44cm、長さ 9.14m、試料採取厚 15cm の鋼矢板 (Sheetpile) を用いた矢板型ジオスライサー 6 枚と、幅 1.2m、長さ 2.0m および幅 1.5m、長さ 4.0m の幅広型ジオスライサー 2 枚の 2 種類計 8 枚を用いた (Fig. 2A, B)。作業には 50t 吊りのクレーンとバイブレーター (ICE 社 model 416) を使用した。掘削位置はトータルステーションを用いた測量によって記録した。

矢板型ジオスライサーでの試料採取の際に生じたコア短縮量は、作業時に随時計測した (Fig. 2C)。試料の短縮は JP サイトで最小 8cm (試料長の 1%; JP-5)、最大 57cm (試料長の 7%; JP-4)、HF サイトで最小 13cm (試料長の 2%; HF-S-1)、最大 1.91m (試料長

の23% ; HF-N-2)であった (Table 1). HF-N-2を除く地点での短縮量はこれまで行われてきたジオスライサー調査の平均的な値(8%程度)の範囲に含まれる。

4.1 JP サイト

ジオスライサー調査は, USGS-UM トレンチの西側で実施した (Fig. 3A, B). トレンチの西にこれとほぼ平行するように池を横切る南北の測線を設定し, 約 5m 間隔で矢板型ジオスライサーの掘削位置を決定した (JP-1~4. JP-3 はコア回収せず). また, 池の中心付近では, トレンチ壁面と平行になるように幅広型ジオスライサー2枚を用いた掘削を行った (JP-7~8). これに加えて, 地表下 1m ほどのトレンチ底では, より深い部分の構造を観察するため矢板型ジオスライサー2本を用いた掘削を行った (JP-5, 6).

4.2 HF サイト

ジオスライサー調査は, 排水路 (ditch) 中の2地点で行った (Fig. 3C). 排水路の壁面に明瞭な噴砂構造が観察される地点 (南サイト) で, 矢板型ジオスライサーを用いて3本 (HF-S-1~3), および幅広型ジオスライサーを用いて1枚 (HF-S-W-1) の地層断面を採取した. また, ここから北に 100m ほど離れた地点 (北サイト) で, 矢板型ジオスライサーを用いて2本 (HF-N-1, 2) の地層断面を採取した. 北サイトでは排水路の壁面に噴砂構造は観察されない。

5. 試料の層序と記載

採取された試料は, すべて剥ぎ取り標本を作成し, 写真撮影を行った後, 層相・色調・粒度等の記載を行った. 各サイトの基本的な層序および主要な液状化 (流動化) の構造をまとめ, トレンチから明らかにされた表層の噴砂構造との対応について記載する。

5.1 JP サイト

ジオスライサー調査によって明らかになった JP サイトの層序は, 地表から深度約 7m まで達するシルト主体の層 (unit 1) とこれ以深の砂層 (unit 2) からなる (Fig. 5).

シルト層 (unit 1) は後背湿地的環境の下で堆積した氾濫堆積物と推定され, トレンチで観察される噴砂構造の縁をなすシルトに対比される. 本層が 7m ほど連続することから, 本地点では, このような後背湿地的環境が比較的長く継続していたと考えられる。

砂層 (unit 2) は中粒砂~粗粒砂を主体とし, クロスラミナが発達することから, 流れのある河床に堆積したものと推定される. 地表付近に認められる噴砂と似た粒度・色調を示し, 上位のシルト層との境界付近ではラミナが不明瞭となり, 上位のシルトを

不規則に削り込むことから, 地震時に液状化を起し, この砂層の上部が噴砂の供給源となったものと推定される. JP-4 では, 無層理の砂層が 50cm ほどの厚さでみとめられ, マッドクラストを含むこと, 貫入構造が認められることから, 比較的規模の大きい液状化の給源をなすと推定される。

JP-5 の深度 7.4m および 7.9m から得た炭化物の ^{14}C 年代は, それぞれ A.D. 970-1190, A.D. 1000-1170 (Mayrose *et al.*, 2002) であることから, 観察された堆積物のほとんどが, 最近の約 1000 年間に急速に堆積したものと推定される。

5.2 HF サイト

ジオスライサー調査によって明らかになった HF サイトの層序は, 6つのユニットに区分され, シルト層 (unit 1, 3, 5) と砂層 (unit 2, 4, 6) の互層からなる (Fig. 6).

unit 1 および unit 3 のシルト層は, JP サイトと同様に後背湿地的環境に堆積した氾濫堆積物からなる. unit 5 のシルトはシルトと極細砂の互層によって構成される. 同ユニット下部には, 植物片や木片を伴い, クロスラミナの発達する中粒砂~細粒砂がレンズ状に挟まれている。

unit 2 および unit 4 の砂層は, 細粒砂~中粒砂を主とし, 明瞭なクロスラミナが発達する (Fig. 6A). いずれもシルト層との境界は明瞭で, 厚さ 3~5cm の酸化した茶褐色シルト混じり極細砂によって覆われる (Fig. 6A). 一方, unit 6 はほぼ一様に無層理の細粒砂~中粒砂からなり, 円磨されていないマッドクラストを多量に含む (Fig. 6B).

水路壁面に認められた噴砂構造は, この直下で採取したジオスライサー断面 (HF-S-W-1) に, 明瞭な砂脈として連続するのが観察され, 少なくとも壁面下 4m まで追跡される (Fig. 7). また, HF-S-2 では, unit 2 を挟んで下位にもマッドクラストを含む無層理の細粒砂~中粒砂が約 2m の厚さで認められることから, 砂脈は少なくとも unit 1~3 を貫いて連続するものと推定される. unit 2 および unit 4 の砂層には, 液状化 (およびそれに伴う流動) を示すような堆積構造の変形や貫入構造は認められない. したがって本地点では, ほぼすべての地点で液状化の特徴を呈する unit 6 の砂層が給源となり, 砂脈を介して地表に噴出したものと推定される. HF-S-3 では, 小規模で高角な断層を境に, unit 4 および unit 5 中のラミナが切断され, 小さな食い違いを生じている. このような高角断層は, 液状化層の流動が堆積物中で不均一に起こることによって, 地中に低密度部あるいは空洞が形成され, これに対して堆積物が崩れ落ちることで生じたと考えられる。

6. おわりに

ジオスライサー調査によって, 地下水位が浅いた

めトレンチ掘削が困難であった地表下 2m 以深の層序と液化化層の形態を調べることができた。地表付近の噴砂の給源が厚い氾濫堆積物の下位にあり、その分布は側方に広がりを持つことが明らかとなった。さらに、地表への噴出経路としての砂脈の構造が解明された。

給源と考えられる砂層中の炭化物から西暦 1000 年頃の ^{14}C 年代値が得られたことは、液化化を引き起こした地震イベントがこれ以降に発生したことを示唆している。

なお、個々の地震イベントとイベント時の液化化痕跡の形成過程については、USGS-UM トレンチ調査の詳細な報告を待って、再度比較・検討する必要がある。

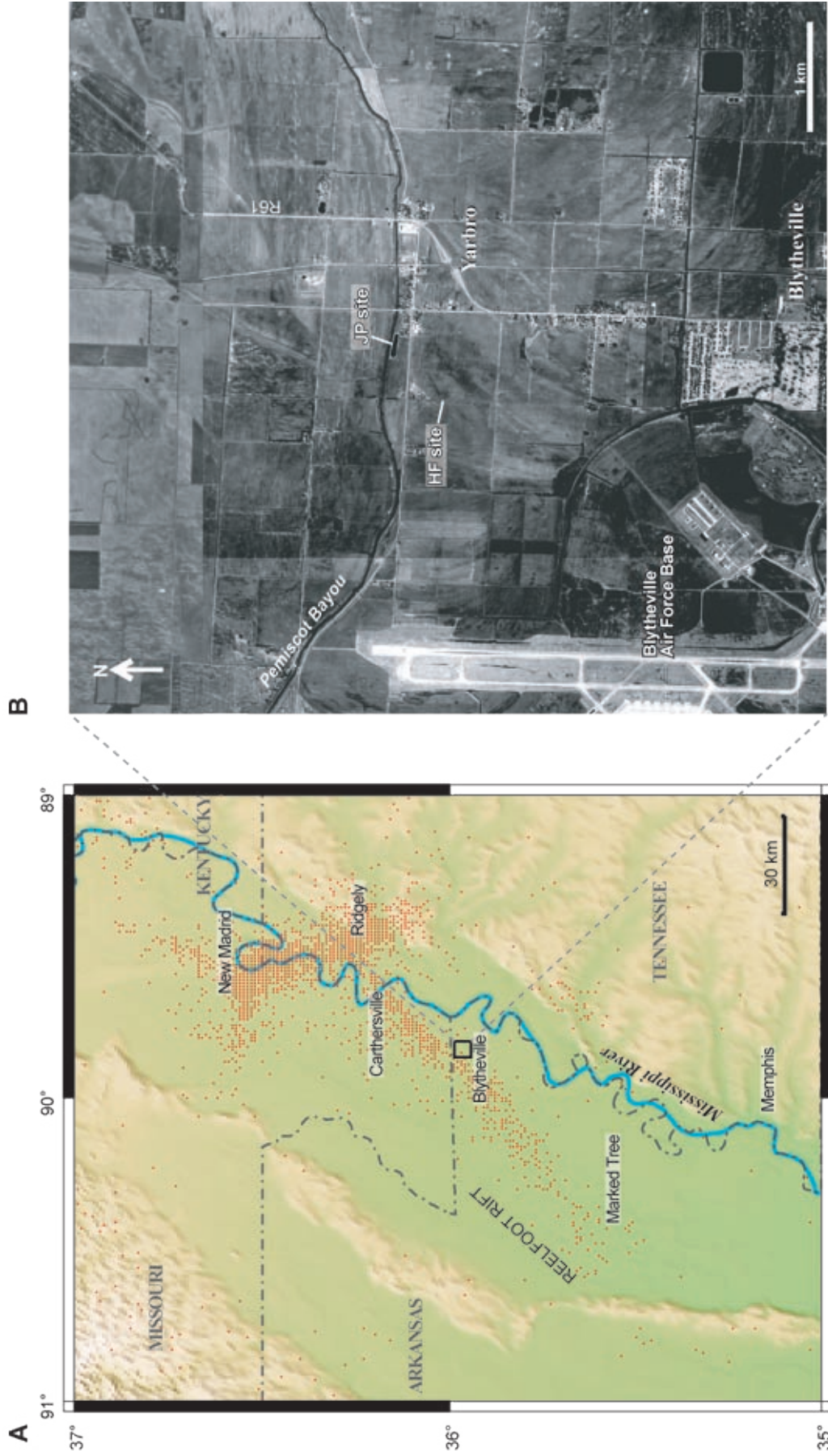
謝辞 本研究の実施にあたっては、メンフィス大学地震調査センターの G. Patterson 氏、アーカンソー州考古学調査所の C. Payne 氏、M. Haynes 氏、USGS の S. Diehl 氏、ミズーリ州自然資源局の D. Hoffman 氏に現地での調整、助言などをいただいた。記して謝意を表します。

なお、本調査は、平成 13 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」の一部として実施された。

文 献

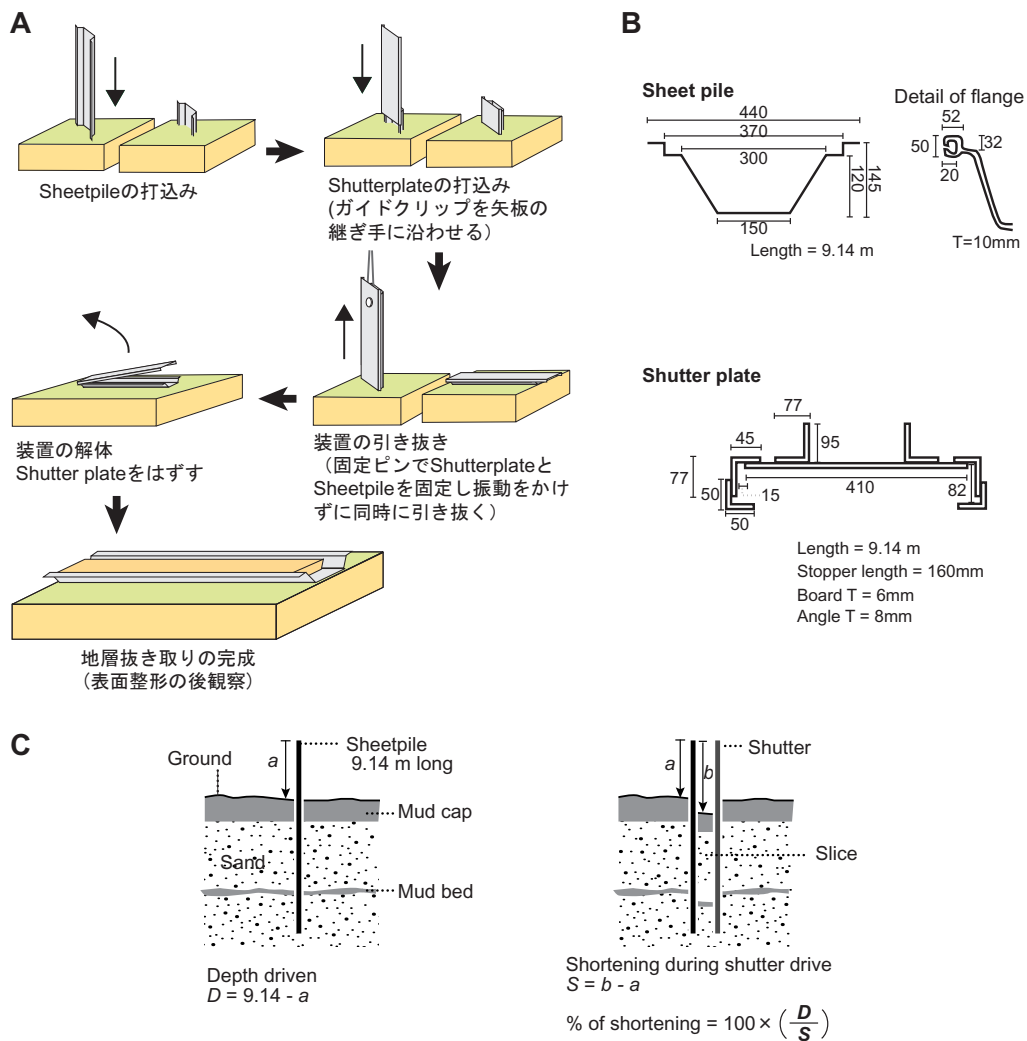
- Atkinson G., B. Bakun, P. Bodin, D. Boore, C. Cramer, A. Frankel, P. Gasperini, J. Gombert, T. Hanks, B. Herrmann, S. Hough, A. Johnston, S. Kenner, C. Langston, M. Linker, P. Mayne, M. Peterson, C. Powell, W. Prescott, E. Schweig, P. Segall, S. Stein, B. Stuart, M. Tuttle, and R. Van Arsdale (2000) Reassessing the New Madrid seismic zone. *Eos Trans. AGU*, **81**, 402-403.
- 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方法 . 地盤工学会誌 , **46** ,24-26 .
- Johnston A.C. and S.J. Nava (1985) Recurrence rates and probability estimates for the New Madrid seismic zone. *J. Geophys. Res.* **90**, 6737-6753.
- Mayrose, L., E. Schweig, M.P. Tuttle, M. Haynes, T. Haraguchi, K. Satake, K. Takada, K. Shimokawa, and K. Okumura (2002) Recent paleoliquefaction studies in the New Madrid seismic zone, central U.S. (Abstract), *Seism. Res. Lett.*, **73**, 247.
- 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. (1989) The New Madrid earthquake: an engineering-geologic interpretation of relict liquefaction features. U.S. Geological Survey Professional Paper, **1336-R**, 114pp.
- Obermeier, S. (1996) Using liquefaction-induced features for paleoseismic analysis. In J.P. McCalpin (ed.), *Paleoseismology*, Academic Press, 331-396.
- Obermeier, S.F. and E. Pond (1999) Issues in using liquefaction features for paleoseismic analysis. *Seism. Res. Lett.* , **70**, 34-58.
- Schweig E.S. and M.A. Ellis (1994) Reconciling short recurrence intervals with minor deformation in the New Madrid (Missouri) seismic zone. *Science*, **264**, 1308-1311.
- Tuttle M.P., R.H. Lafferty III, and E.S. Schweig III (1998) Dating of the liquefaction features in the New Madrid seismic zone and implications for earthquake hazard. U.S. Nuclear Regulatory Commission, *NUREG GR-0017*, 77 pp.
- Tuttle M.P., J.D. Sims, K. Dyer-Williams, R. H. Lafferty III, and E. S. Schweig III (2000) Dating of the liquefaction features in the New Madrid seismic zone. U.S. Nuclear Regulatory Commission, *NUREG GR-0018*, 42 pp.
- Tuttle M.P. and E.S. Schweig (1995) Archeological and pedological evidence for large prehistoric earthquakes in the New Madrid seismic zone, central United States. *Geology*, **23**, 253-256.

(受付 : 2002 年 7 月 1 日 , 受理 : 2002 年 9 月 10 日)



第1図. ニューマドリッド地震帯における最近の地震活動 (A) と調査地点周辺の空中写真 (B). 震央分布 (1974-2000) は Center for Earthquake Research and Information (CERI) による. 空中写真は, U.S. Geological Survey: 10 Apr. 1996 および 16 Feb. 1994 を使用.

Fig. 1. Index map of survey site. A: seismicity of New Madrid seismic zone. B: aerial photographs around the study site. The epicenter data (1974-2000) are from Center for Earthquake Research and Information (CERI) and the aerial photographs were taken by U.S. Geological Survey on 10 April 1996 and 16 February 1994.

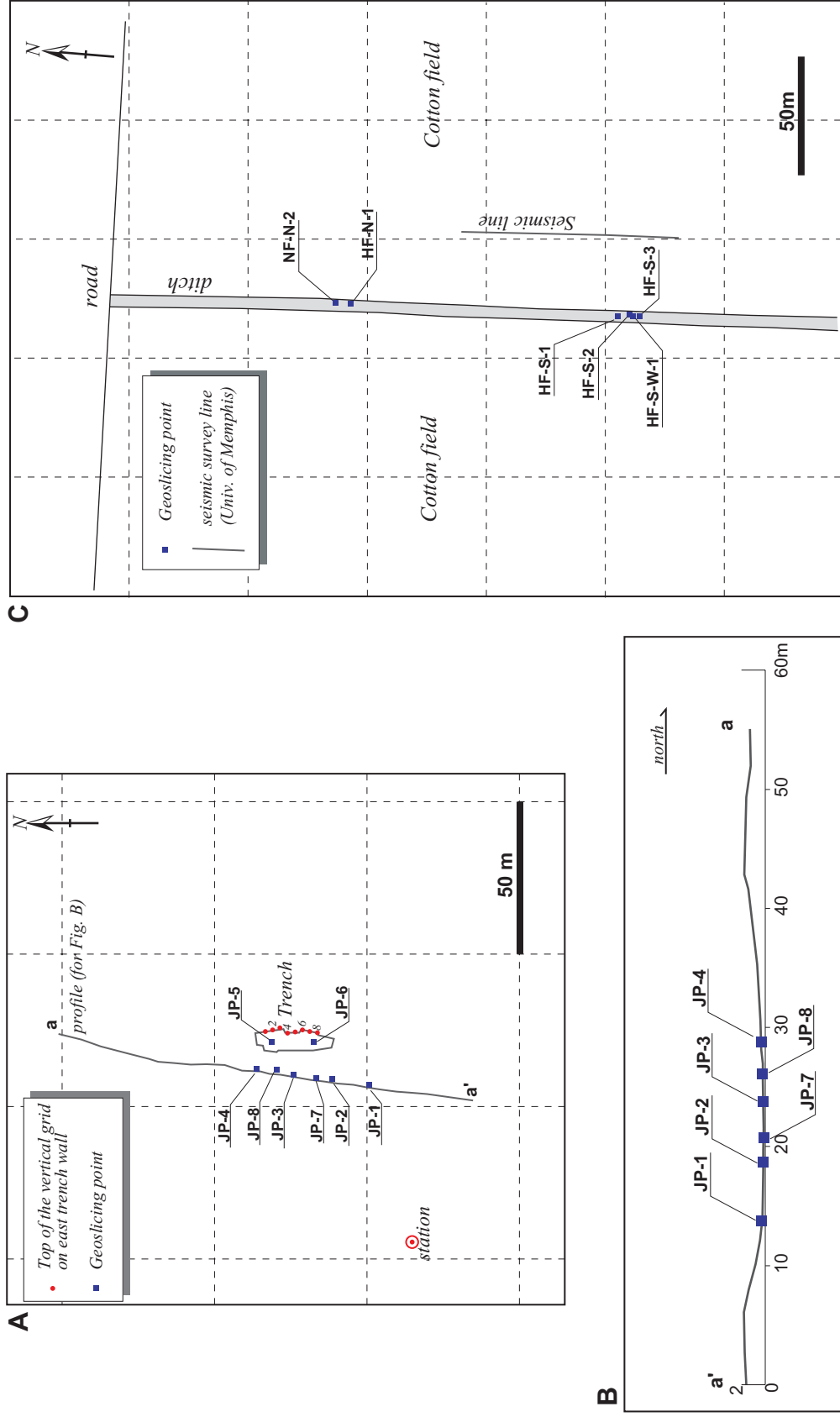


第2図. 調査方法の概要. A: ジオスライサー調査のながれ, B: ジオスライサーの断面形状, C: 試料短縮量の計測方法.

Fig. 2. Methodology of the geoslicer survey. A: procedure of the geoslicer survey, B: cross-section of the geoslicer, C: measurement of the slice shortening.

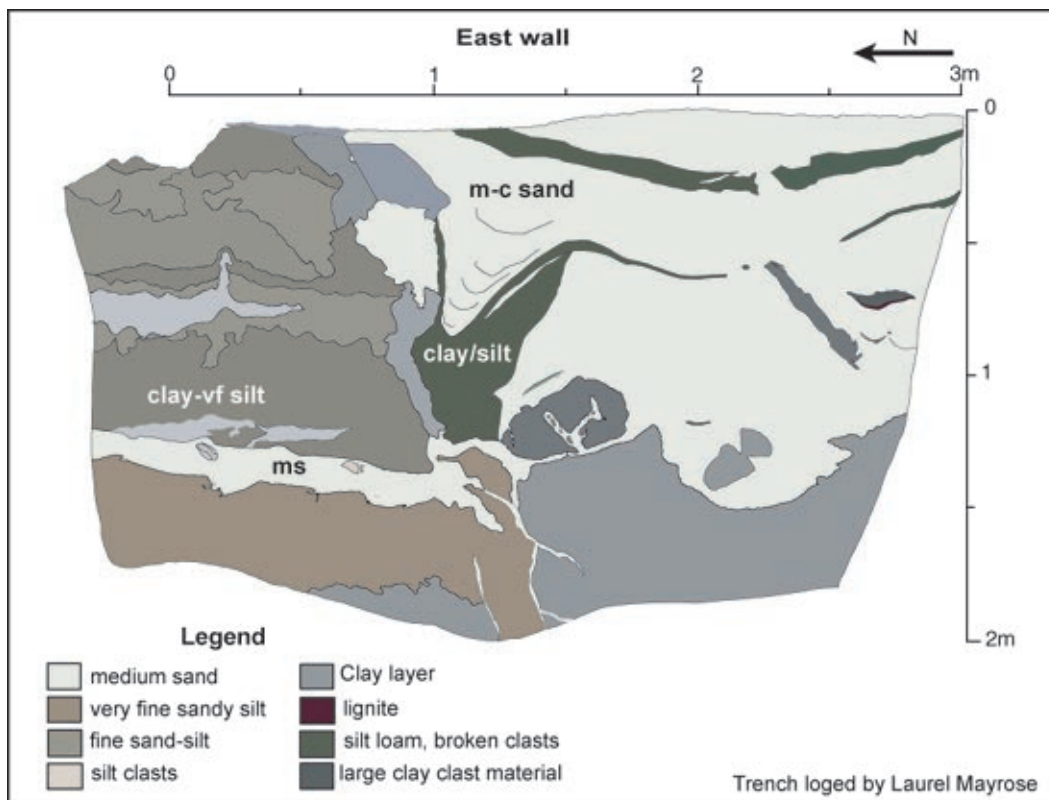
第1表. 矢板型ジオスライサー試料の短縮 (JPサイトおよびHFサイト).
Table 1. Shortening of slices during geoslicing.

JPサイト				HFサイト					
Slice	Depth driven (meter below ground surface) (D)	Sortening during shutter plate drive (S) (m)	Sortening during shutter plate drive (%)	Extracted slice in sample tray (m)	Slice	Depth driven (meter below ground surface) (D)	Sortening during shutter plate drive (S) (m)	Sortening during shutter plate drive (%)	Extracted slice in sample tray (m)
JP-1	8.13	0.43	5	7.43	HF-S-1	8.3	0.15	2	8.28
	8.19	0.43	5	7.55		8.34	0.13	2	8.2
JP-2	8.29	0.35	4	7.7	HF-S-2	8.39	1.22	15	7.13
	8.29	0.35	4	7.81		8.49	1.37	16	7.07
JP-4	8.4	0.57	7	7.76	HF-S-3	8.41	0.4	5	7.27
	8.44	0.52	6	7.73		8.44	0.49	6	7.29
JP-5	8.1	0.08	1	8	HF-N-1	7.88	0.91	12	7.65
	8.15	0.13	2	7.94		7.89	0.9	11	7.8
JP-6	8.32	-0.04	0	8.22	HF-N-2	8.14	1.91	23	6.23
	n.d.	n.d.	n.d.	8.27		8.04	1.87	23	6.19

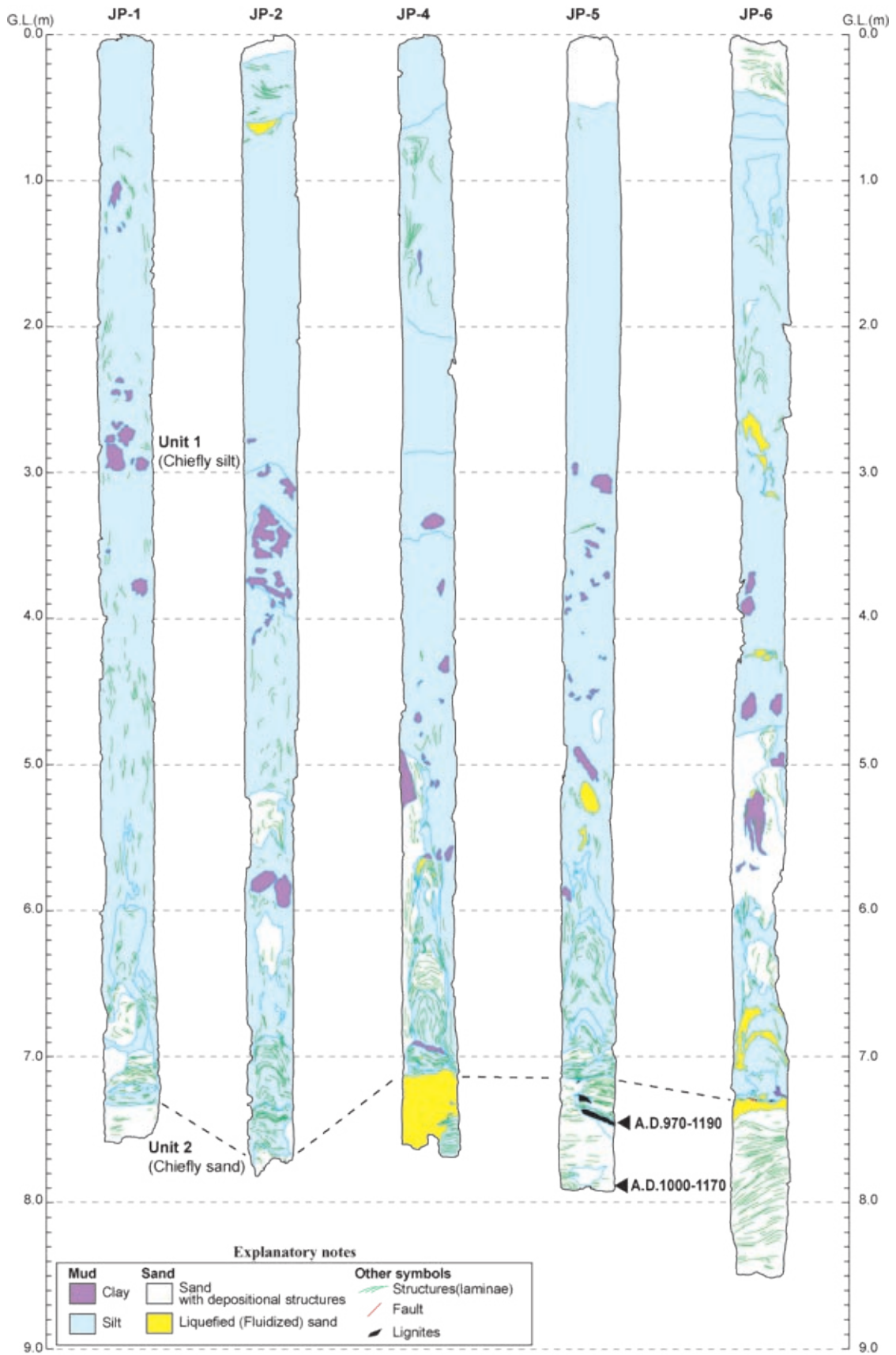


第3図. ジオスライサー掘削位置詳細図. A: JPサイトにおける掘削位置平面図, B: JPサイトにおける掘削位置断面図, C: HFサイトにおける掘削位置平面図.

Fig. 3. Location maps of the geoslicer surveys. A: plan view of the JP site, B: cross-section view of the JP site, C: plan view of the HF site.

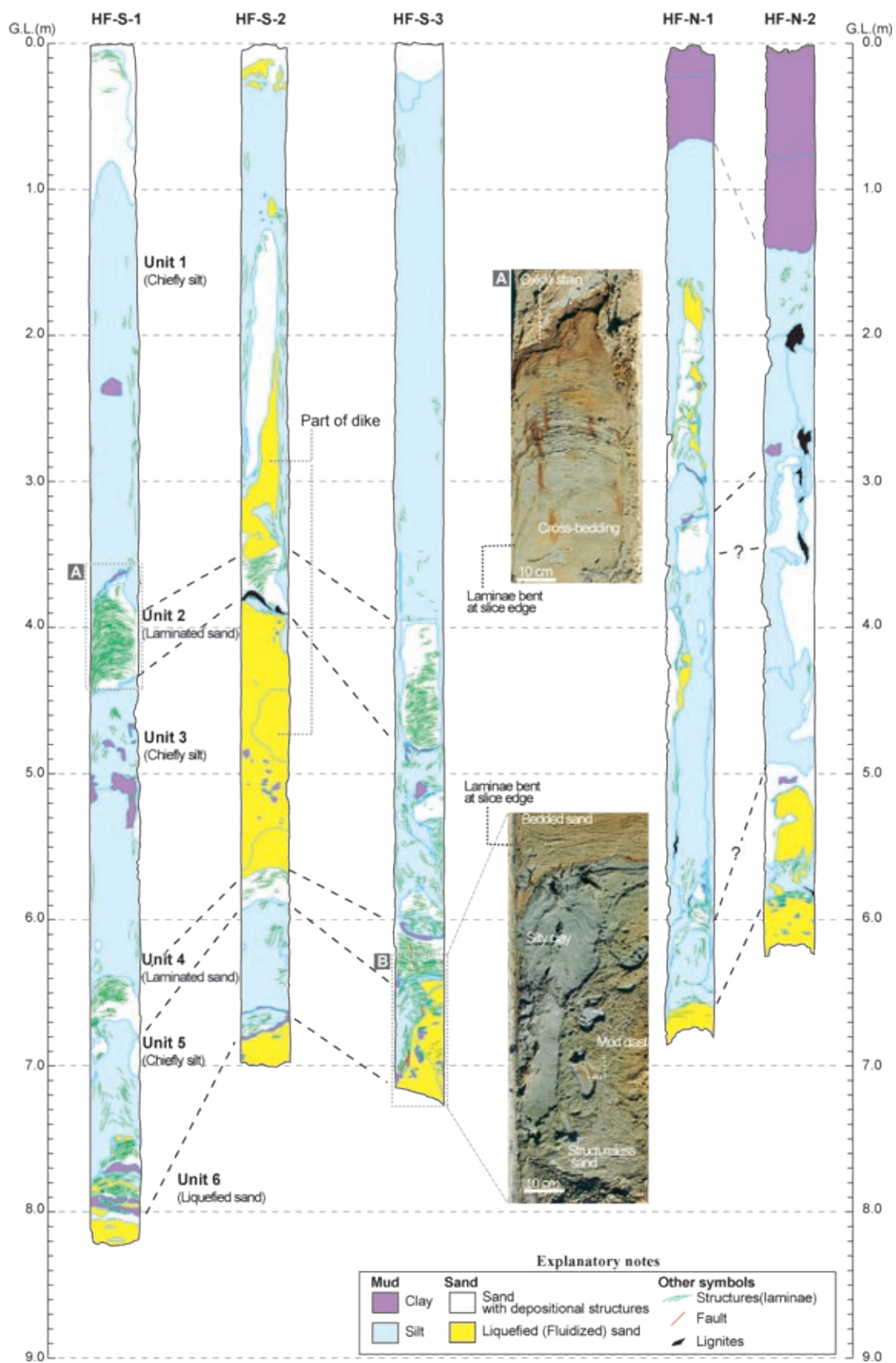


第4図. JP サイトトレンチで観察された噴砂構造.
Fig. 4. Sand blow feature on the trench wall at the JP site.



第5図. JPサイトの試料スケッチ.

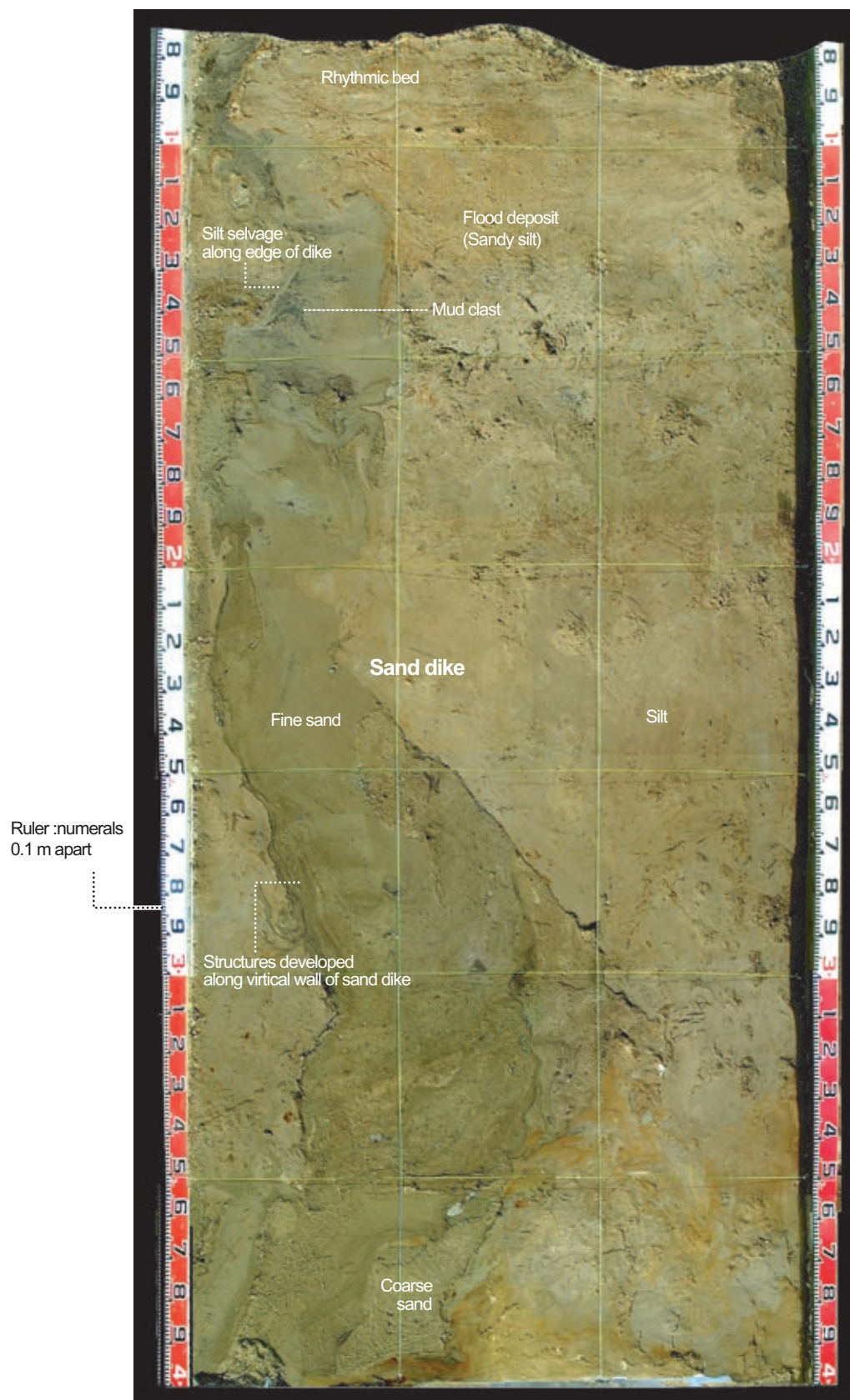
Fig. 5. Logs of geoslices at the JP site.



第6図. HFサイトの試料スケッチ. 写真A, Bの位置はスケッチ中に示す.

Fig. 6. Logs and photos (A and B) of geoslices at the HF site.

HF-S-W-1



第7図. ダイクを含むジオスライサー断面 (HF-S-W-1) .
Fig. 7. Sand dike extracted in geoslice HF-S-W-1.