

サンアンドレアス断層系ヘイワード断層におけるジオスライサー調査 Geoslicing the Hayward fault beneath trench bottom

遠田晋次¹・中田 高²・奥村晃史³・高田圭太⁴・原口 強⁵

Shinji Toda¹, Takashi Nakata², Koji Okumura³, Keita Takada⁴ and Tsuyoshi Haraguchi⁵

¹活断層研究センター (Active Fault Research Center, GSJ/AIST, s-toda@aist.go.jp)

^{2,3}広島大学大学院文学研究科 (Department of Geography, Hiroshima Univ., tnakata@hiroshima-u.ac.jp, kojiok@hiroshima-u.ac.jp)

⁴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)

⁵復建調査設計株式会社 (Fukken Co.Ltd., haraguchi@fukken.co.jp)

Abstract: We performed the geoslicer survey on the southern Hayward fault at Tule Pond, near Fremont BART station, in order to obtain deeper paleoseismological information than reached by conventional trenching technique. Tule Pond is an active pull-apart depression formed within a right-stepover in the right-lateral Hayward fault. Recent intensive trenching surveys by the U. S. Geological Survey, exposing strata shallower than ~3 m, have revealed evidence for four faulting events since AD 1400, including the historically documented 1868 earthquake. Two slicers, 2 m long by 1.2 m wide and 4 m long by 1.5 m wide, were vibrated into ground from the trench bottom through the main fault scarp and secondary faults. The slicers successfully sampled undisturbed slices including downward continuation of the faults down to a depth of 5 m from the ground surface. The oldest stratum exposed on the trench walls was traceable in the slices. Significantly larger vertical displacement of this stratum than the displacement of upper unit indicates an older event horizon of the Hayward fault.

キーワード:ヘイワード断層, サンアンドレアス断層系, 古地震, ジオスライサー, トレンチ調査
Keywords: Hayward fault, San Andreas fault system, paleoseismology, geoslicer, trench excavation

1. はじめに

活断層研究センターは, 2001年10月にアメリカ合衆国地質調査所(以下USGS)と共同で, ヘイワード(Hayward)断層の地層抜き取り調査を実施した。この調査の目的は, トレンチ掘削の困難な地表面下3m以深の地質断面を得ることにより, ヘイワード断層のより古い古地震イベントを検出することである。本調査では, USGSの研究チームが先行実施したトレンチの底面からジオスライサーを打ち込み, 地表下約5mまでの地質構造を明らかにした。

なお, 本稿は高田ほか(2002)に掲載できなかった図・情報を加え, 再構成したものである。

2. ヘイワード断層の概要

ヘイワード断層はサンフランシスコ湾の東に位置し, サンアンドレアス(San Andreas)断層に並走する北西-南東走向, 長さ約70kmの右横ずれ断層である(Lienkaemper, 1992; Fig. 1A)。リッチモンド(Richmond)からフリーモント(Fremont)に至る区間で明瞭な変位地形が認められ, その北端はサンパ

ブロ(San Pablo)湾内に達する。ヘイワード断層の平均変位速度は約9mm/yrと推定されているが, このうちの半分(4.5mm/yr)は浅部のクリープによる。1868年に湾岸地域で被害が記録されているM7の地震は, 断層の南半部(南部セグメント; 約40km)が活動したためとされている。また, これに先行した1836年の地震(M6.3/4)では, ヘイワード断層北半部(北部セグメント)が活動した可能性が指摘されている(Wallace *et al.*, 1990)。このような研究成果をもとに地震確率が算定され, ヘイワード断層が今後30年間(西暦2000年~2030年)に活動する確率は32%で, 湾岸地域で最も危険な活断層と考えられている(Working Group on California Earthquake Probabilities, 1999)。

3. 調査地点周辺の地形およびトレンチ調査の概要

調査は, フリーモント市の湾岸鉄道(BART)駅に近いツレーポンド(Tule Pond)で実施された。この調査地点はヘイワード断層南部セグメント上にあり, 丘陵の麓沿いに北西-南東方向に分布する断層がア

ラメダ川 (Alameda Creek) によって作られた沖積低地を横切っている。ツレポンドは、ヘイワード断層がミ型に雁行する地点に形成された小規模なプルアパート地溝 (pull apart depression) である (Fig. 1 B, C)。この地溝にはシルトと粘土を主体とする細粒堆積物が連続して厚く堆積しており、断層活動履歴を解明するには最適な場所である。

ツレポンドは、その地形的特徴から多くのトレンチ調査が実施されており、池を取り囲んで分布する断層を横切って多数のトレンチが掘削されてきた。トレンチ壁面で観察される地表下 2~3 m 以浅 (およそ西暦 1400 年以降) の地質データから、断層の活動間隔は 150~250 年と推定されている (Lienkaemper *et al.*, 2001a, 2001b)。

ツレポンド周辺は、乾燥する夏季に池の水が干上がり、地下水位も低下する。このため、掘削調査は主としてこの季節に集中して行われている。

ジオスライサー調査に先行して実施された USGS の 2001 年のトレンチは、長さ約 10 m、幅約 1 m、深さ約 3 m の規模で、トレンチの壁面はショア (shore; 支保) によってほぼ垂直に保たれていた。トレンチ壁面には、低断層崖基部に位置する東側低下の主断層帯と、主断層との間に小規模な凹地を形成する西側低下の副次断層帯が認められる。断層は堆積物を明瞭に切断・変位させ、これらのうちいくつかは鍵層として広く対比できる。USGS による検討の結果、断層による切断関係、変位量の違い等から、4 回の地震イベントが検出された (Fig. 6)。地震イベントの直後には、静穏な環境下で堆積した有機質粘土層が堆積する傾向がある (Lienkaemper *et al.*, 2001b)。

なお、トレンチに認められるごく小規模な凹地では、過去 600 年間を通じて ~3 mm/yr の沈降が生じており、160 (+30/-10) 年の平均活動間隔が推定されている (Lienkaemper *et al.*, 2001a)。

4. 調査方法

ジオスライサー調査は、中田・島崎 (1997) の方法 (Fig. 2) により、USGS トレンチの底から実施した (Fig. 3)。サンプルボックスとしては、幅 1.5 m・長さ 4 m、および幅 1.2 m・長さ 2 m の 2 種類の装置を用意した。また、打ち込み・引き抜き作業には、油圧式パイプレーター (ICE model 216)、最大引き抜き荷重 40 t のクローラクレーンを使用した。

本調査では、大型のパイプレーターをトレンチ内に入れる必要があるため、掘削に先立ちトレンチの幅を南側に約 70 cm 拡張した。これにより、ジオスライサー掘削位置を、トレンチの南壁面の直下に据えた。以下、トレンチ壁面とジオスライサー試料断面の対比は南壁面を基準とする。ジオスライサーとトレンチ壁面のずれは 20~30 cm 以内である (Fig. 3 A)。掘削点の標高はトレンチのグリッドから簡易計測によって求め、壁面に投影した (Fig. 3 B)。

5. 試料断面の記載と地質構造の解釈

主断層帯において 1 枚、副断層帯において 2 枚の計 3 枚のジオスライサー試料を採取した。その後、それぞれの試料断面についてスケッチを作成し、堆積物の粒度、色調等を記載した (Figs. 4, 5)。トレンチ壁面とジオスライサー試料断面の合成図を Fig. 6 に示す。主要な鍵層を A~H として表示した。明瞭な断層構造が観察された GS-2~4 試料について、層序および断層構造を簡単に記す。

(1) GS-2 試料 (Fig. 4)

本試料はトレンチ西端の主断層帯の直下で採取され、大きく 2 つの層に区分される。凹地の基底をなす、しまりの良いシルト層 (後期更新世) とそれを覆う有機質堆積物である。基底のシルト層は、主断層帯を境にして東側に大きく低下し、その変位量はトレンチ壁面と GS-2 で得られた地層が対比可能だとすると、3 m 以上に達する。この基底層を覆う有機質堆積物は、暗褐色~暗灰色を呈するシルト~細粒砂の互層で、そのうち中粒砂は淡水生の貝殻片を多く含む。試料には、鉛直に延びる 2 条の断層が認められた。これらの上方延長が、トレンチ壁面で観察される主断層前縁の分岐断層であることがわかる。

(2) GS-3 試料 (Fig. 4)

トレンチの中央部に現れた副次的断層帯の西側で採取された。本試料は、大きく 3 つの層に区分される。断面の東端に幅 15 cm 程度で帯状に分布する有機質暗灰色シルト、この西側に分布する灰色のシルト層、およびこれを覆う細粒砂と灰色シルトの互層である。東端の有機質暗灰色シルトは、ほぼ鉛直な断層によって分布を断たれており、試料断面ではこの断層の西側には見られない。したがって、この層の鉛直変位量は、最低でも 2 m に達すると推定される。灰色シルト層は、5~7 条の鉛直な断層によって、西側に向かって階段状に落ち込むようにおよそ 1.3 m 低下する。それぞれの断層は割れ目を形成しており、暗褐色の有機質シルトによって充填される。互層中に挟在する貝殻混じり砂層は、断層により明瞭に断ち切られている。GS-3 中の断層のうち、西よりの 2 条の延長は、トレンチ壁面には認められず、より古いイベントの発生層準を示唆する。

(3) GS-4 試料 (Fig. 5)

採取に当たっては、東側の副次断層帯をねらった。試料断面には V 字状に分岐する断層が明瞭に認められた。また、その断層帯を境に、地層の切断、変位が認められた。断層は試料最下部で 1 条になる。この断層帯はトレンチ壁面に認められる 2 条の断層に連続し、変位の累積が見られる。分岐した断層では、西側の断層 (約 85° 東傾斜) を境に大きく地層が異なる。つまり、西側の断層がこの断層帯の主トレースをなし、東側の断層 (約 75~80° 西傾斜) が主トレースから分岐したものと推定される。主トレースに沿ってはさらに小規模な副次的断層が複数分岐し、

堆積物にわずかな変位を与えている。

断層の東側では、下半部に有機質の暗灰色シルト層(H層)が厚く堆積する。この地層は断層を境に明瞭に変位し、V字状の断層帯内で約25cm落ち込む。また、断層帯の西側ではこの地層が見られないことから、少なくとも95cm以上の鉛直変位を被っている可能性がある。本層直上に堆積する炭化物混じりの灰色シルト層(G層)も同様の変位センス・変位量を示す。断層帯西側には明灰色のシルト層(F層)が厚く堆積しており、V字状の断層帯内、トレンチ壁面でも追跡できる。

F層は断層帯内の灰白色粘土を挟む粘土層に対比され、その上面の鉛直変位量は断層帯を挟んで約160cmである。一方、E層の鉛直変位量は、地層の撓み変形を含めても、最大で130cmほどである。また、E層とF層上面間の厚さは、断層の東側で50cm程度であるのに対して、西側では100cm以上に達しており有意に層厚が異なる。従って、F層堆積後、E層堆積前にイベントがあったと考えることができる。

G層、H層は断層帯の西側では観察されていないため、その鉛直変位量を知ることはできない。しかし、V字状の落ち込みの東側を限る断層での変位量は、F層で30cmほどであるのに対して、G層、H層ではいずれも50cmと若干大きいことから、さらに古いイベントの発生層準を含む可能性がある。

6. おわりに

今回のジオスライサー調査によって、従来のトレンチ掘削では調査できなかったハイワード断層の地表下3m以深の地質構造の一部を明らかにできた。イベントの発生時期、平均発生間隔の推定はUSGSで実施している¹⁴C年代測定の結果を待って改めて議論する必要がある。

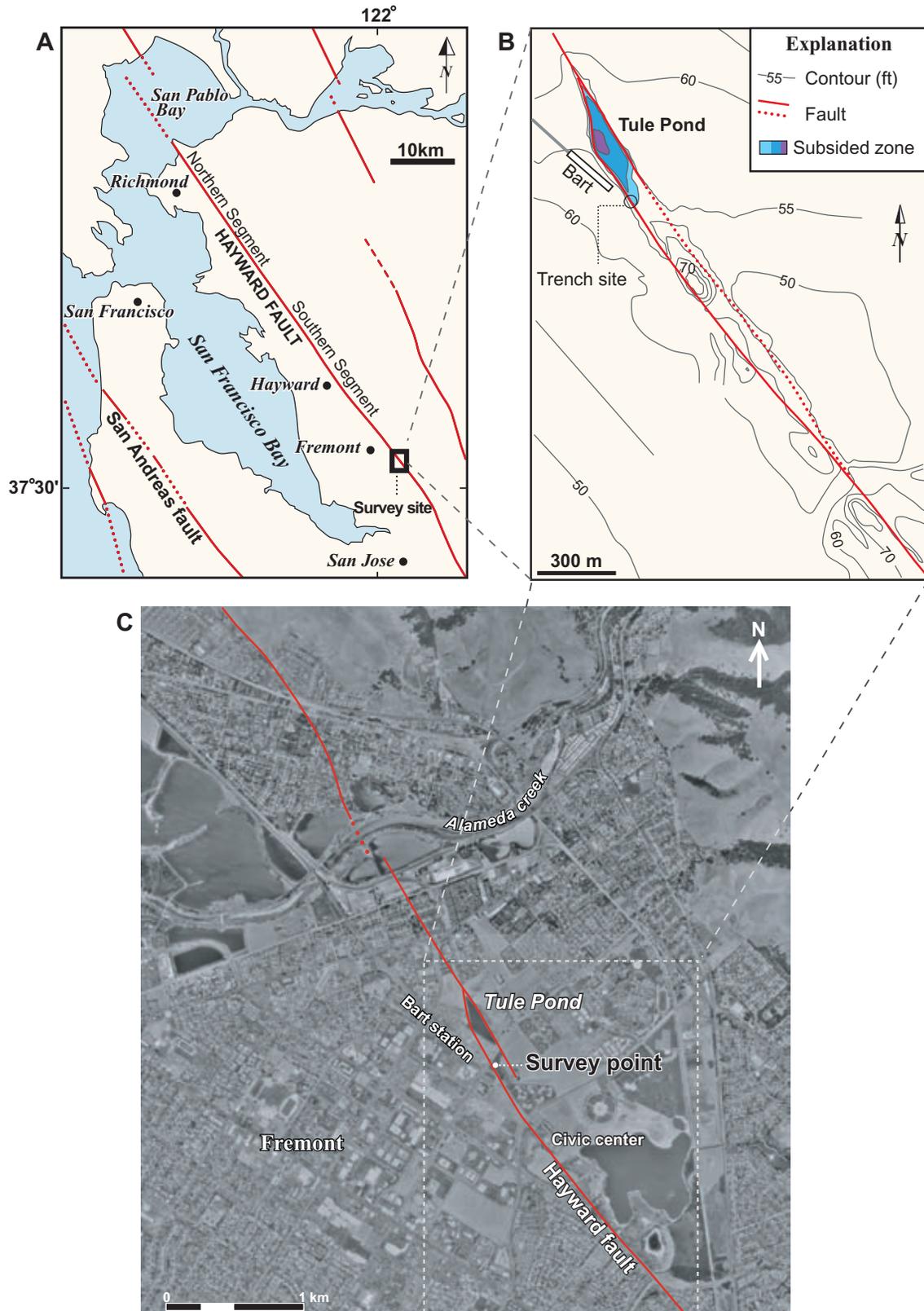
今後、同様の調査を継続し、過去の地震イベントを数多く検出することによって、ハイワード断層の地震確率予測の高精度化に貢献できるものと期待している。

なお、本調査で採取された試料のうち、明瞭な断層が認められるGS-4試料は、地層剥ぎ取り標本として、活断層研究センターに保存・展示されている。また、ハイワード断層調査に関する追加情報・写真等を http://staff.aist.go.jp/s-toda/Web/hayward_GS.html に掲載している。

文献

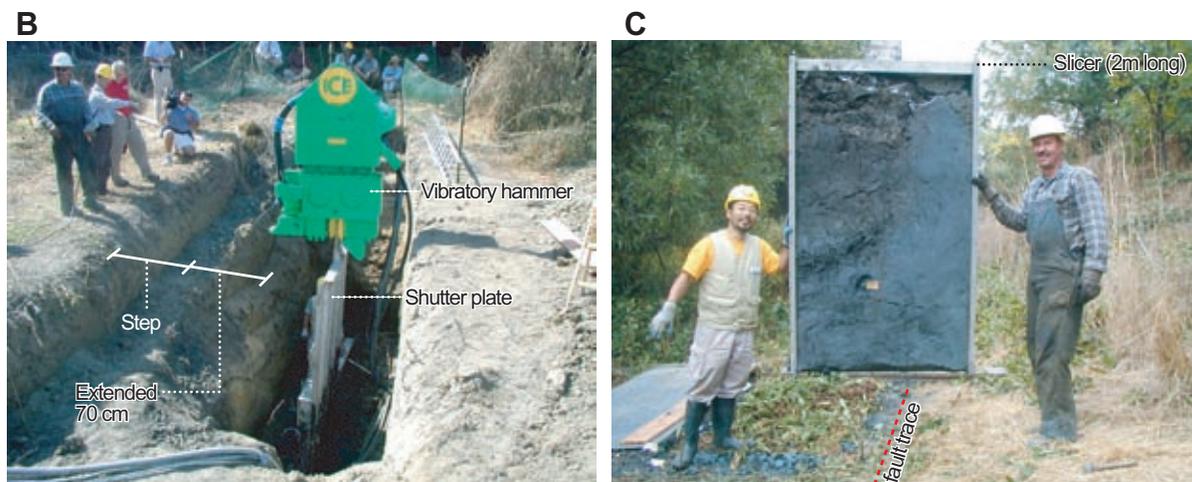
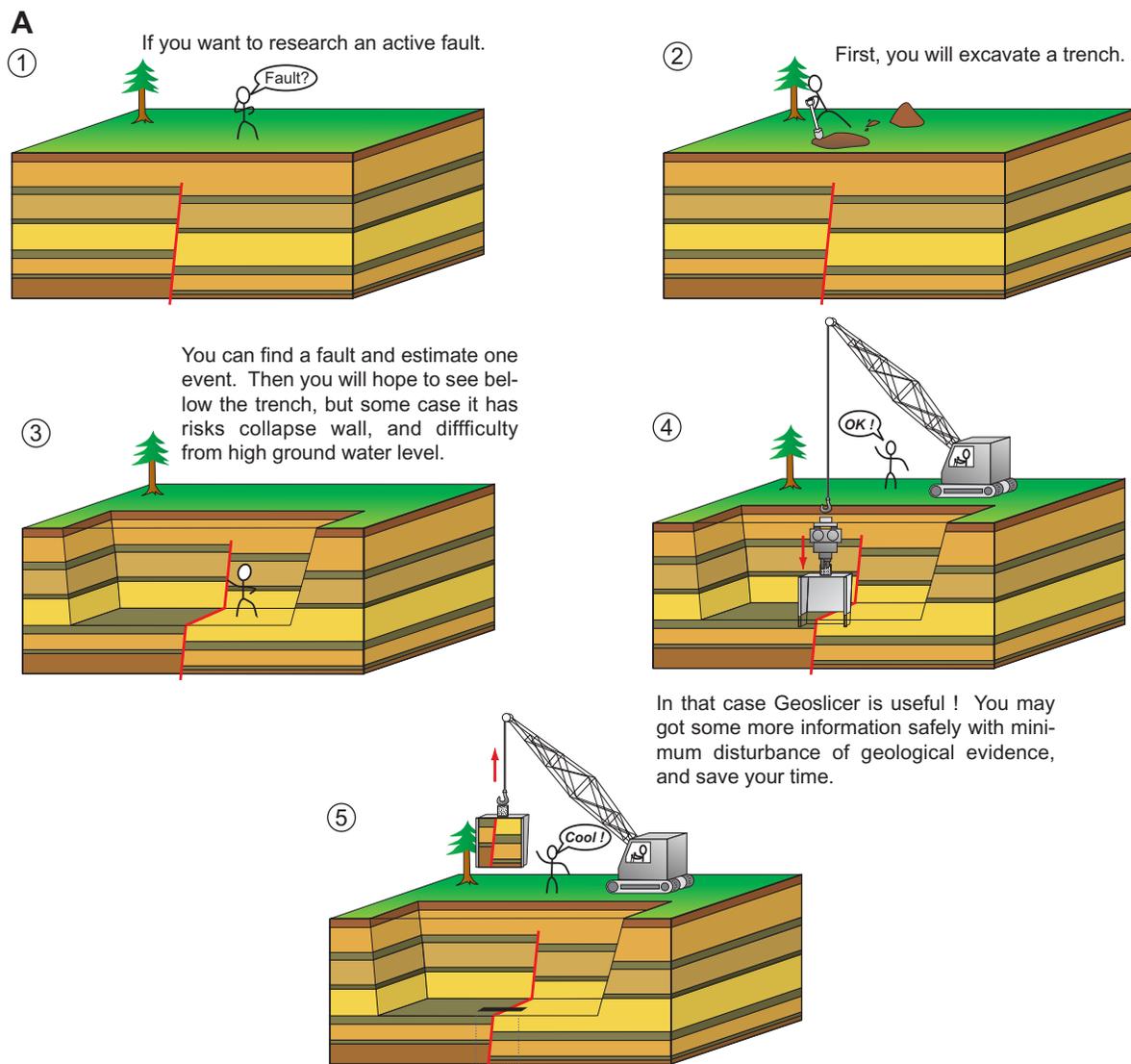
- Lienkaemper, J. J. (1992) Map of recently active traces of the Hayward fault, Alameda and Contra Costa counties, California. Miscellaneous Field Studies Map, 13p, U.S. Geological Survey.
- Lienkaemper, J. J., T. E. Dawson, S. F. Personius, G. G. Seiz, L. M. Reidy and D. P. Schwartz (2001a) Evidence for timing of paleoearthquakes on the southern Hayward Fault at Tyson's lagoon (Tule Pond), northern California, *Seism. Res. Lett.*, **72**, no. 2, P 226.
- Lienkaemper, J. J., T. E. Dawson, S. F. Personius, G. G. Seiz, L. M. Reidy and D. P. Schwartz (2001b) Logs and data from trenches across the Hayward fault at Tyson's lagoon (Tule Pond), Fremont, Alameda county, California. Miscellaneous Field Studies Map MF-23XX, U.S. Geological Survey.
- 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.
- 高田圭太・遠田晋次・中田 高・奥村晃史・原口 強(2002)サンアンドレアス断層系ハイワード断層におけるジオスライサー調査<調査速報>, *日本地震学会ニュースレター*, **13**, no. 6, 3-6.
- Wallace, R. E., ed. (1990) The San Andreas Fault System, California, U.S. Geological Survey Professional Paper 1515, 283p.
- Working Group on California Earthquake Probabilities (1999) Earthquake probabilities in the San Francisco Bay region, 2000-2030 -Summary of findings, U.S. Geological Survey Open file report 99-517.

(受付:2002年7月1日,受理:2002年9月17日)



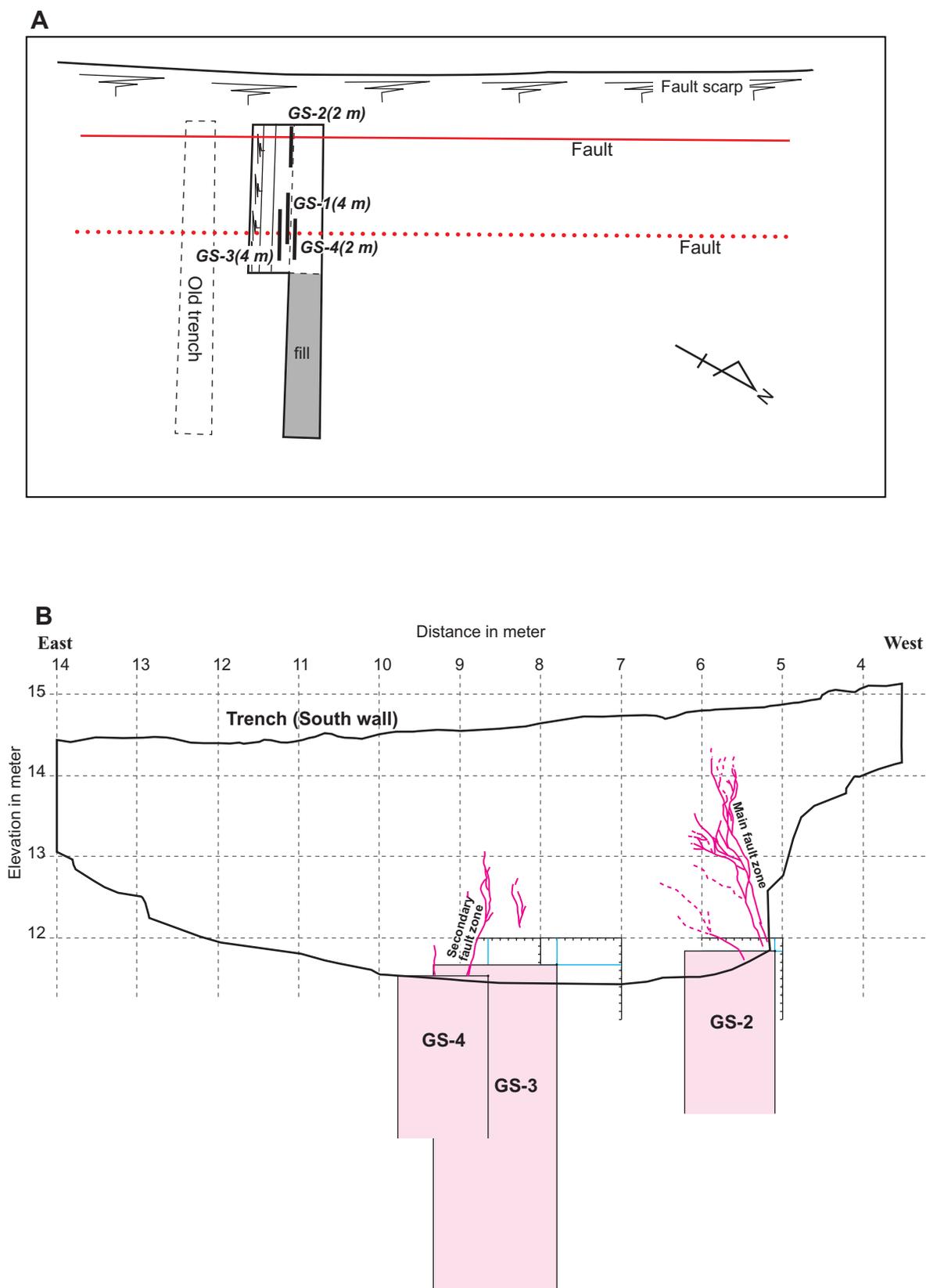
第1図. 調査地域の概観図および空中写真. A: サンフランシスコ湾岸地域の活断層分布, B: 調査地域周辺の詳細図, C: フリーモント市街地の空中写真. 空中写真はU.S. Geological Survey: 16 Jun. 1993を使用. 断層位置は, Lienkaemper (1992)による.

Fig. 1. Index map of the survey site. A: active faults around San Francisco Bay, B: detailed map of the survey site, C: aerial photograph of Fremont. The aerial photograph was taken by the U. S. Geological Survey in 16 June, 1993. The fault traces are after Lienkaemper (1992).



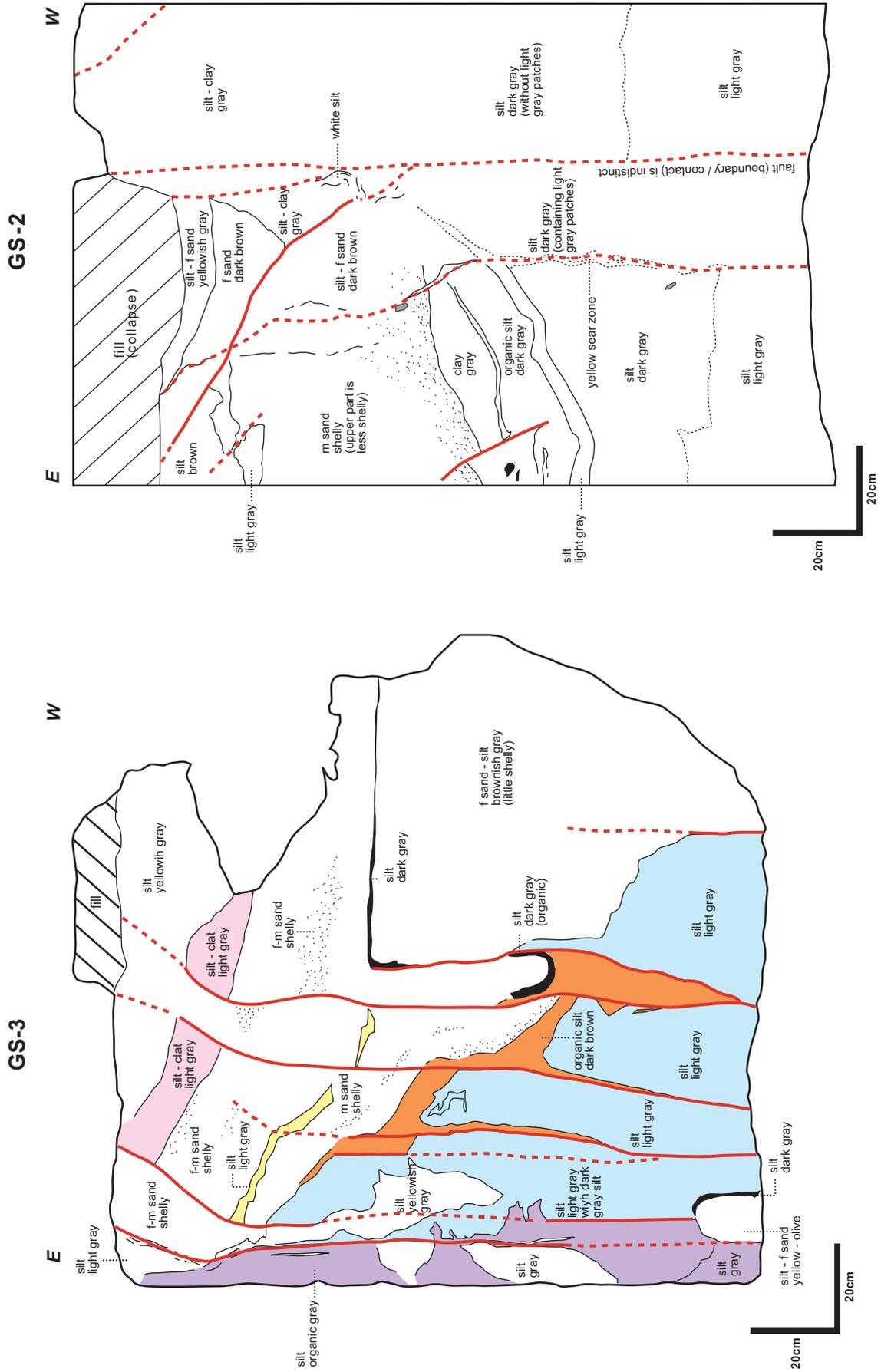
第2図. 活断層トレンチ調査へのジオスライサーの適用. A : 調査のながれ, B : シャッタープレートの打ち込み, C : 抜き取られた試料断面 (GS-2) .

Fig. 2. Application of geoslicer to active fault research at conventional trench sites. A: flow of the survey, B: driving a geoslicer from the bottom of the trench, C: an extracted geoslice showing layers displaced by faults.



第3図. ジオスライサー掘削位置の詳細図. A: 掘削位置平面図, B: 掘削位置のトレンチ南壁面への投影図.
 Fig. 3. Location of the geoslices. A: plan view of the slices, B: projection of the slices to the south wall of the USGS trench.

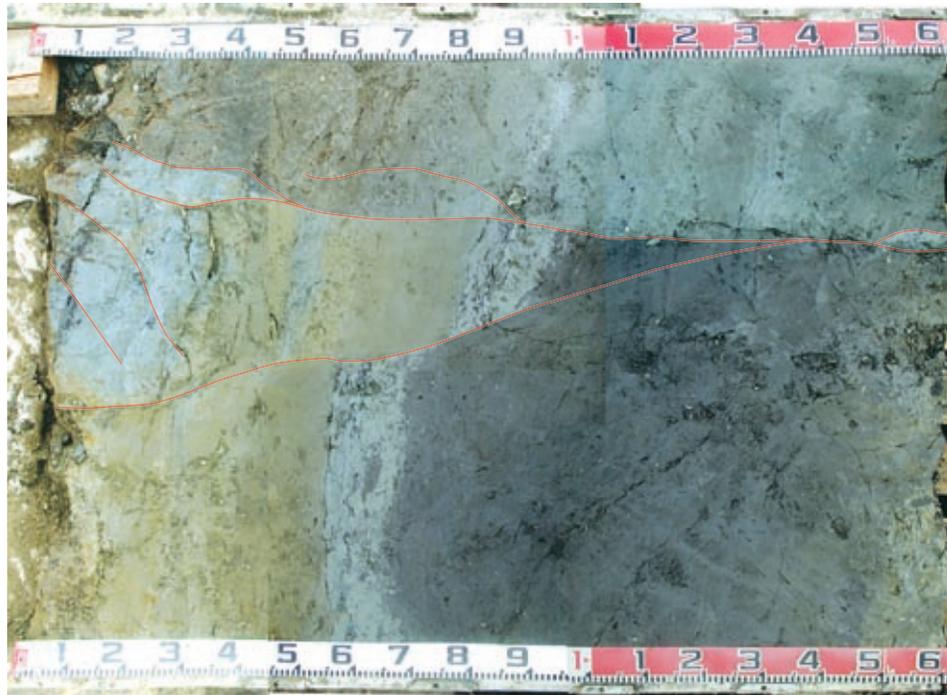
サンアンドレアス断層系ヘイワード断層におけるジオスライサー調査



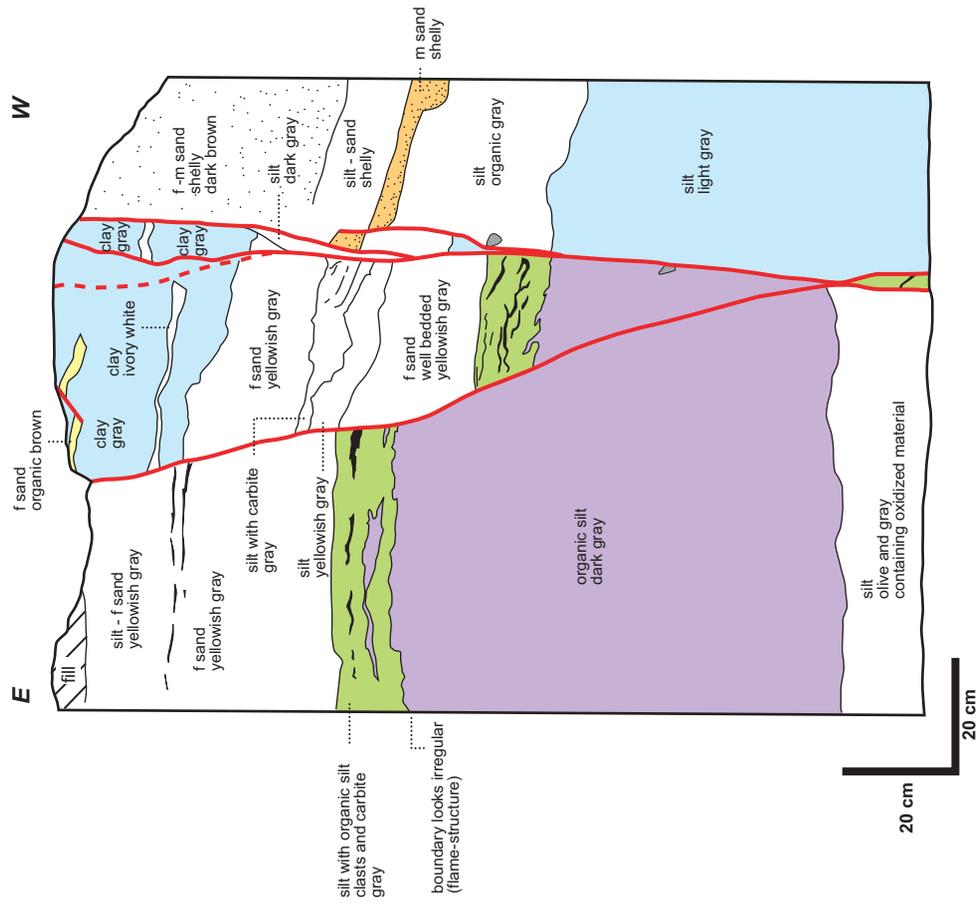
第4図. GS-2およびGS-3試料断面のスケッチ。
Fig. 4. Logs of the slices 2 and 3.

GS-4

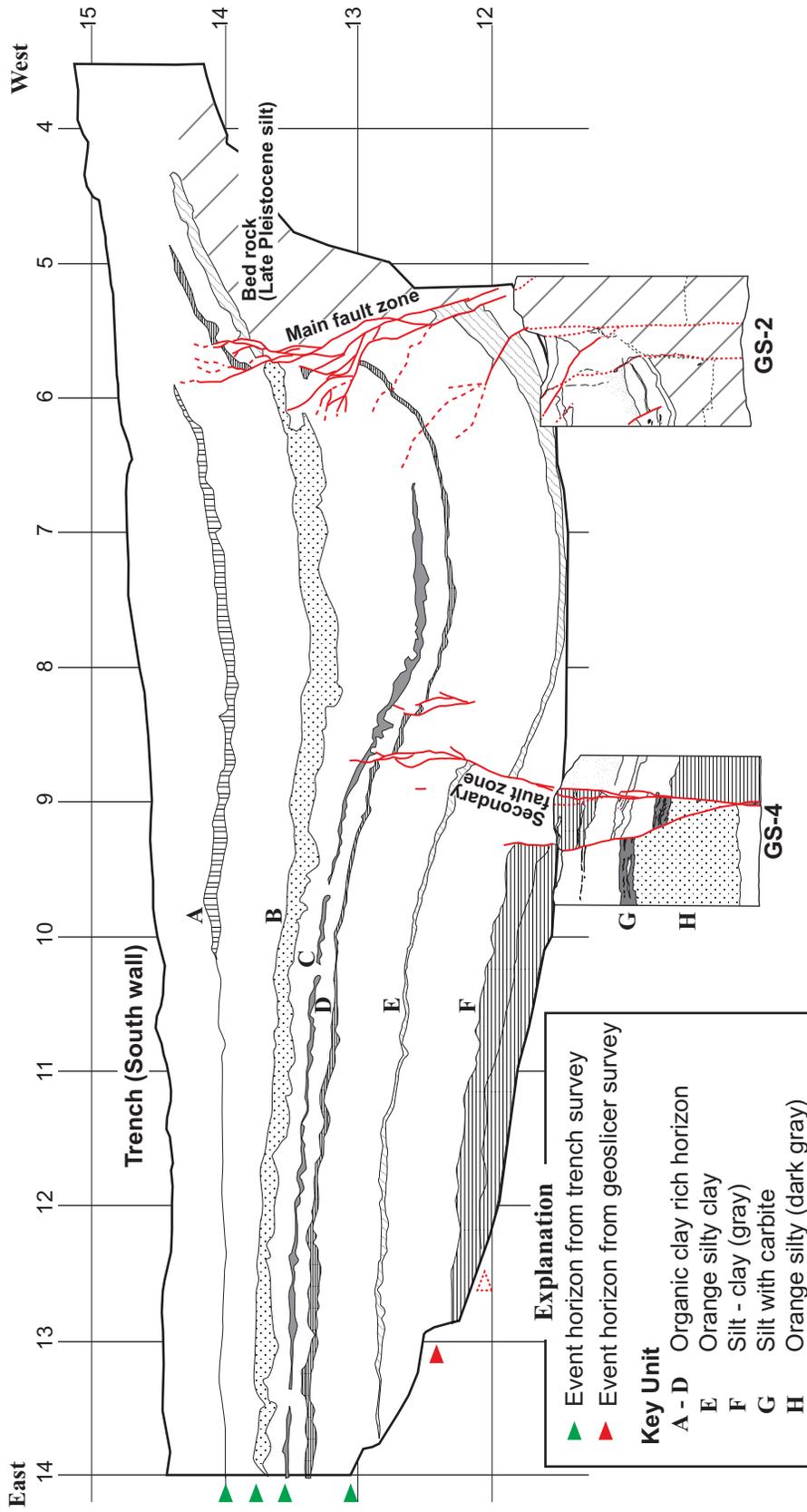
Photo of slice



Log from peel



第5図. GS-4試料断面のスケッチおよび試料写真.
Fig. 5. Log and photo of the slice 4.



第6図. USGS トレンチ壁面とジオスライサー試料断面の合成図.
Fig. 6. Composite log of the USGS trench and geoslices.