


光ファイバーひずみ計測システムおよび加速度センサを用いた 4 m大型二軸摩擦実験のひずみ・変位計測

Measurements of Strain and Displacement During 4 m Biaxial Rock Friction Experiment Using Fiber Bragg Grating Sensors and Accelerometers



防災科学技術研究所研究資料

- 第 417 号 長岡における積雪観測資料(39) (2016/17 冬期) 29pp. 2018 年 2 月発行
- 第 418 号 土砂災害予測に関する研究会 2017 年度プロシーディング 149pp. 2018 年 3 月発行
- 第 419 号 九州北部豪雨における情報支援活動に関するインタビュー調査 90pp. 2018 年 7 月発行
- 第 420 号 液状化地盤における飽和度確認手法に関する実験的研究 –不飽和化液状化対策模型地盤を用いた模型振動台実験– 62pp. 2018 年 8 月発行
- 第 421 号 新庄における気象と降積雪の観測(2016/17 年冬期) 45pp. 2018 年 11 月発行
- 第 422 号 2017 年度防災科研クライシスレスポンスサイト(NIED-CRS)の構築と運用 56pp. 2018 年 12 月発行
- 第 423 号 耐震性貯水槽の液状化対策効果に関する実験研究 –液状化による浮き上がり防止に関する排水性能の確認– 48pp. 2018 年 12 月発行
- 第 424 号 パイプロを用いた起振時過剰間隙水圧計測による原位置液状化強度の評価手法の検討–原位置液状化強度の評価に向けた土槽実験の試み– 52pp. 2019 年 1 月発行
- 第 425 号 ベントナイト系遮水シートの設置方法がため池堤体の耐震性に与える影響 102pp. 2019 年 1 月発行
- 第 426 号 蛇籠を用いた耐震性道路擁壁の実大振動台実験および評価手法の開発–被災調査から現地への適用に至るまで– 114pp. 2019 年 2 月発行
- 第 427 号 津波シミュレータ TNS の開発 67pp. 2019 年 3 月発行
- 第 428 号 長岡における積雪観測資料(40) (2017/18 冬期) 29pp. 2019 年 2 月発行
- 第 429 号 配管系の弾塑性地震応答評価に対するベンチマーク解析 72pp. 2019 年 3 月発行
- 第 430 号 津波浸水の即時予測を目的とした津波シナリオバンクの構築 169pp. 2019 年 3 月発行
- 第 431 号 土砂災害予測に関する研究会 2018 年度プロシーディング 65pp. 2019 年 3 月発行
- 第 432 号 全国を概観するリアルタイム地震被害推定・状況把握システムの開発 311pp. 2019 年 3 月発行
- 第 433 号 新庄における気象と降積雪の観測(2017/18 年冬期) 51pp. 2019 年 3 月発行
- 第 434 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み –南西レスキュー 30 における活動報告– 158pp. 2019 年 6 月発行
- 第 435 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み –みちのく ALERT2018 における活動報告– 140pp. 2019 年 7 月発行
- 第 436 号 平成 30 年 7 月豪雨（西日本豪雨）の被災自治体における災害情報システムの活用実態に関する調査 60pp. 2019 年 9 月発行
- 第 437 号 SIP4D 利活用システム技術仕様書・同解説 142pp. 2019 年 10 月発行
- 第 438 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み –かもしか RESCUE2019 における活動報告– 46pp. 2019 年 12 月発行
- 第 439 号(1) 南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価 第一部 本編 575pp. 付録編 514pp. 2020 年 4 月発行
- 第 440 号 蛇籠を用いた構造物の合理的な設計手法のための変形メカニズムに関する実験研究–蛇籠の理論体系構築に向けた基礎的研究– 26pp. 2020 年 1 月発行
- 第 441 号 長岡における積雪観測資料(41) (2018/19 冬期) 25pp. 2020 年 3 月発行
- 第 442 号 新庄における気象と降積雪の観測(2018/19 年冬期) 47pp. 2020 年 2 月発行
- 第 443 号 クラウドファンディングを活用した研究事例 –ネパール組積造住宅の耐震補強実験を例として– 32pp. 2020 年 3 月発行
- 第 444 号 南海トラフで発生する地震・津波を対象とした広域リスク評価手法の検討 163pp. 2020 年 3 月発行
- 第 445 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み – 01TREX/ 南海レスキュー 01 における活動報告– 23pp. 2020 年 6 月発行
- 第 446 号 災害関連情報の効果的アーカイブ方法の検討 –都道府県の公式ホームページから発信される情報・資料を対象に– 81pp. 2020 年 7 月発行
- 第 447 号 土のう構造体を用いた道路盛土の新たな耐震補強工法に関する実大震動台実験 –地震災害後の道路の早期復旧と中長期的な維持に向けての検証– 68pp. 2020 年 7 月発行
- 第 448 号 E-Defense を用いた実大 RC 橋脚(C1-2 橋脚)震動破壊実験研究報告書 –主鉄筋段落としを有する RC 橋脚の耐震性に関する震動台実験– 46pp. 2020 年 8 月発行
- 第 449 号 E-Defense を用いた実大 RC 橋脚(C1-6 橋脚)震動破壊実験研究報告書–ポリプロピレンファイバーコンクリートを用いた高耐震性能橋脚の開発– 36pp. 2020 年 9 月発行
- 第 450 号 令和元年東日本台風(台風第 19 号)による各県の被害概要および受援設備の整理 85pp. 2020 年 9 月発行

 表紙写真・・・4 m 大型二軸摩擦試験機の写真(Photo of 4 m biaxial rock friction apparatus).

防災科学技術研究所研究資料

- 第 451 号 地震と降雨の作用を受ける蛇籠擁壁の安定性に関する実験的研究 –蛇籠擁壁の粘り強さの検証– 40pp. 2020 年 11 月発行
- 第 452 号 令和元年台風 15 号 千葉県における高齢者被災状況調査報告 83pp. 2021 年 2 月発行
- 第 453 号 2018 年度防災科研クライシスレスポンスサイト(NIED-CRS)の構築と運用 43pp. 2021 年 2 月発行
- 第 454 号 新庄における気象と降積雪の観測(2019/20 年冬期) 41pp. 2021 年 2 月発行
- 第 455 号 ISUT による災害情報の統合と共有–令和元年台風第 15 号(房総半島台風)および台風第 19 号(東日本台風)の事例– 92pp. 2021 年 2 月発行
- 第 456 号 有珠山壮瞥火山観測井コア試料の岩相と層序 36pp. 2021 年 2 月発行
- 第 457 号 降雨と地震の作用下におけるため池堤体の変形・破壊に関する実験研究 –ため池の安全性向上に向けて– 29pp. 2021 年 1 月発行
- 第 458 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取組–令和 2 年度長野県大規模風水害図上訓練における活動報告– 19pp. 2021 年 2 月発行
- 第 459 号 米国の連邦および地方政府と地方自治体の災害対応に関する現地調査報告 – FEMA Region 9, カリフォルニア州を対象に– 66pp. 2021 年 2 月発行
- 第 460 号 地震による直接被害額のリアルタイム推計方法の検討 88pp. 2021 年 2 月発行
- 第 461 号 長岡における積雪観測資料(42) (2019/20 冬期) 16pp. 2021 年 2 月発行
- 第 462 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み–沖縄県 SIP4D 接続実証実験の活動報告– 48pp. 2021 年 5 月発行
- 第 463 号 2019/2020 年度 土砂災害予測に関する研究会 プロシーディング 145pp. 2021 年 7 月発行
- 第 464 号 SIP4D 利活用システム技術仕様書・同解説 – 第 2 版 : SIP4D-ZIP への対応等に関する改定 – 137pp. 2021 年 8 月発行
- 第 465 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み –03JXR/ 令和 3 年度第 1 回東京都図上訓練における活動報告– 65pp. 2021 年 11 月発行
- 第 466 号 SIP4D 利活用システムの社会実装事例 –宮崎県防災情報共有システムの事例– 116pp. 2021 年 11 月発行
- 第 467 号 1662 年日向灘地震における慰霊碑及び歴史的資産に関する研究 37pp. 2021 年 12 月発行
- 第 468 号 新庄における気象と降積雪の観測(2020/21 年冬期) 45pp. 2022 年 1 月発行

– 編集委員会 –		防災科学技術研究所研究資料 第 469 号
(委員長)	下川 信也	
(委員)		令和 4 年 2 月 2 日発行
木村 武志	姫松 裕志	編集兼 国立研究開発法人
河合 伸一	三浦 伸也	発行者 防災科学技術研究所
山崎 文雄	平島 寛行	〒 305-0006
藤原 淳	川嶋 一浩	茨城県つくば市天王台 3 – 1
(事務局)		電話 (029)863-7635
三浦 伸也	前田佐知子	https://www.bosai.go.jp/
池田 千春		印刷所 前田印刷株式会社
(編集・校正)	樋山 信子	茨城県つくば市山中 152-4

© National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 2022

※防災科学技術研究所の刊行物については、ホームページ (<https://dil-opac.bosai.go.jp/publication/>) をご覧ください。

光ファイバーひずみ計測システムおよび加速度センサを用いた 4 m 大型二軸摩擦実験のひずみ・変位計測

大久保蔵馬*・山下 太*・福山英一**,*

Measurements of Strain and Displacement During 4 m Biaxial Rock Friction Experiment Using Fiber Bragg Grating Sensors and Accelerometers

Kurama OKUBO*, Futoshi YAMASHITA*, and Eiichi FUKUYAMA**,*

*Earthquake and Tsunami Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan

** Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan
kokubo@bosai.go.jp

Abstract

We measured local strain change and co-seismic displacement of rock specimen installed in 4 m biaxial rock friction apparatus using fiber Bragg grating (FBG) sensors, microelectromechanical system (MEMS) accelerometers and piezoelectric (PZ) accelerometers. The measurements of strain using the FBG sensors are verified with those of semiconductor strain gauges (SGs), showing the noise level of FBG sensors is low enough to quantify the strain change due to the co-seismic slip. However, the measurement resolution of the strain needs to be improved as its co-seismic change associated with a single slip event is nearly in the same order of its resolution. We then developed a process flow of converting the acceleration during the slip event measured with accelerometers near the fault to the co-seismic displacement. PZ accelerometers were overloaded due to the amplification of its high-frequency response, while we obtained the acceleration without overload for the case with MEMS accelerometers because of the attenuation in high-frequency components. We obtained a reasonable estimation of the co-seismic displacement using MEMS uniaxial accelerometer in comparison to the slip on the fault measured with eddy current displacement (GAP) sensor. This study provides the accuracy and quantitative objectives of FBG sensors and accelerometers for the measurements of strain and co-seismic displacement during stick-slip experiments, which help for further applications on the large-scale biaxial rock friction experiments to discuss the nucleation and rupture process of faults.

Key words: FBG sensor, Accelerometer, Rock friction experiment, Large-scale biaxial friction apparatus, Stick-slip events

1. はじめに

防災科学技術研究所が保有する 4 m 大型二軸摩擦実験装置を用いて、摩擦すべりに伴う岩石試料のひずみ・変位・アコースティックエミッション(AE)の測定が行われてきた。岩石試料を用いた実験で

は、ポリカーボネートやアクリル素材を用いた摩擦実験(Latour *et al.*, 2013; Svetlizky and Fineberg 2014; Buijze *et al.*, 2020)と比較して試料の変形が小さく、弾性波速度も速いことから、高感度・高サンプリングレートによるデータ収録が不可欠である。また、

* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門

** 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

表1 略称一覧
Table 1 List of abbreviations.

Abbreviation	Description
FBG	fiber Bragg grating
MEMS	microelectromechanical system
PZ	piezoelectric accelerometer
SGB	bi-axial strain gauge
SGT	tri-axial strain gauge
GAP sensor	eddy current displacement sensor installed on fault
HFS	high-frequency sampling
LFS	low-frequency sampling

大型二軸摩擦試験機の特徴を生かし、断層面内の破壊伝播様式を議論するためには多点での計測も必要となる (Fukuyama *et al.*, 2018). 光ファイバによるひずみ計測は1本の光ファイバで多点のひずみを計測可能であることに加え温度の同時計測も可能であり、またその設置も比較的容易であることから、本実験装置において、これらの利点を生かした断層近傍でのひずみ・温度計測が期待されている。

局所変位の測定に使用される渦電流式ギャップ (GAP) センサには用途に応じて様々な測定レンジのものが存在し、室内実験における1つの不安定すべりに伴う断層面の微小な相対変位 (すべり量 ~100 μm) を計測可能なものがある。しかし、その場合は狭ダイナミックレンジのため測定できる最大すべり量が数 mm 程度に制限されることから、不安定すべりの繰り返しによる破壊様式の連続変化を捉える際の制約となっている。大型岩石摩擦実験において、加速度センサによる変位推定が GAP センサの代替手法となり得ることが示されている (Urata *et al.*, 2017) ことから、本実験装置においてもスティックスリップ時のすべり量を加速度の二階積分から推定することができるかどうかを検討する必要がある。

このような研究背景から、本実験では光ファイバひずみ・温度計測システムである fiber Bragg grating (FBG) センサ、および microelectromechanical system (MEMS)・圧電式 (piezoelectric transducer: PZ) 加速度センサを用いた摩擦実験中のひずみ・加速度計測を実施し、それぞれの測定データを処理後、半導体ひずみゲージや GAP センサのデータと比較することで、両センサの計測精度を評価する。

2. 実験実施要綱

本実験は、防災科学技術研究所つくば本所内に設置された 4 m 大型二軸摩擦試験機 (図 1) を用いて実施された。この試験機は、長さ、幅、高さがそれぞれ 4.1×0.1×0.2 m の岩石試料の上に 4.0×0.1×0.2 m の試料を重ね、垂直荷重を与えた状態で下側岩石試料に側面から載荷することで摩擦面での動的なすべりを再現する装置である。岩石試料にはインド産変斑レイ岩が用いられ、その弾性定数はヤング率 103 GPa、ポアソン比 0.31、密度 2,980 kg/m³ である (Fukuyama *et al.*, 2016)。

本試験機の岩石試料には半導体ひずみゲージ (2 軸口ゼットゲージ SGB: KSN-2-120-F3-11, 3 軸口ゼットゲージ SGT: SKS-30282, 株式会社共和電業製)、GAP センサ (FL-202F05L-M1, 新川電機株式会社製)、AE センサ (V103-RM, オリンパス株式会社製) が試料側面に取り付けられている。また、断層面の相対変位と出力電圧の関係を線形補正するため、GAP センサはスラスト変換器 (VM-21T, 新川電機株式会社製) に接続されている。それぞれのサンプリング周波数 (Fs) は、ひずみゲージと GAP センサが 1 MHz、AE センサが 10 MHz である。本解析では、このうちひずみゲージと GAP センサの測定値を用いて、FBG センサと加速度センサによるひずみ・変位計測の精度について議論する。

3. 光ファイバを用いたひずみ計測

3.1 FBG センサの測定原理

FBG センサによるひずみ・温度計測では、通常石英ガラス素材を用いたシングルコアの光ファイバが用いられる (Kreuzer, 2006)。これは、 $\phi 4\text{-}9\ \mu\text{m}$ のインナーコアと、 $\phi 125\ \mu\text{m}$ の被覆 (クラッド) によって構成され、ゲルマニウムなどの屈折率調整剤を添加することでインナーコアの屈折率を被覆に対して大きくし、光がインナーコア内を直進するように設計される。光ファイバを用いたひずみ計測では、このインナーコアの任意の区間 (通常 8 mm 長) にレーザーを照射し、屈折率変調による回折格子を形成する。この区間を FBG ゲージと呼ぶ。回折格子の幅を Λ 、光ファイバの屈折率を n とすると、反射光が強めあう条件は、光路差が $2n\Lambda$ であることから、

$$\lambda_B = 2n\Lambda \tag{1}$$

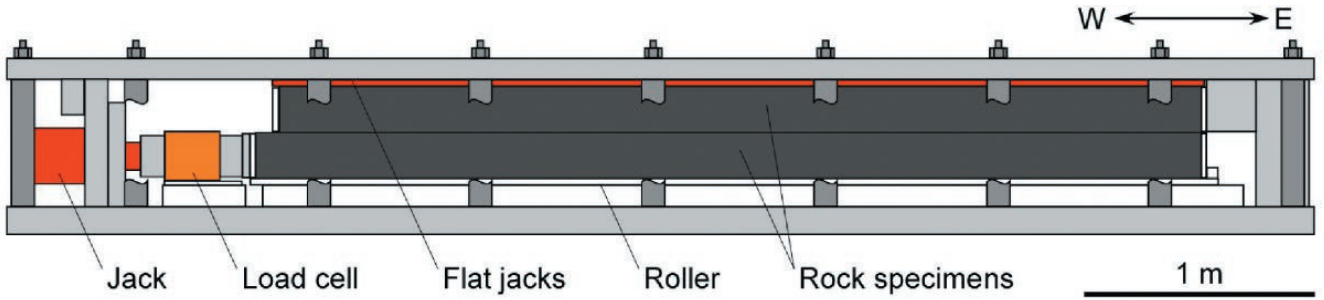


図 1 4 m 岩石摩擦試験機の概要図 (Yamashita *et al.*, 2019 より引用). せん断荷重の载荷に伴う準静的なひずみ蓄積や、不安定すべり時の動的なひずみ変化および上下岩石試料間の相対変位が測定されている。

Fig. 1 Schematic of 4 m biaxial rock friction apparatus. The quasi-static strain accumulation, dynamic change in strain, and relative displacement on the fault are measured during stick-slip experiments.

と表される。ここで、 λ_B は真空中での明線条件を満たす波長で、ブラッグ波長と呼ばれる。この回折格子の λ_B を中心とした反射スペクトルは、

$$R_i = \frac{\lambda_B}{\pi N \Delta \lambda_i} \sin\left(\frac{\pi N \Delta \lambda_i}{\lambda_B}\right) \quad (2)$$

と表される (Kreuzer, 2006)。 N は FBG ゲージ中の格子数、 $\Delta \lambda_i$ はブラッグ波長からの差を表す。また、反射スペクトルのピークから 50% のレベルのスペクトル幅を Full-Width-Half-Maximum (FWHM) と呼ぶ。FBG ゲージの代表的な定数 ($n=1.46$, $\lambda_B=1550$ nm, $\Lambda=530$ nm, FBG ゲージ長 6 mm, $N=11300$) を用いた反射スペクトルを図 2 に示す。

式 (1) から分かるように、 λ_B は回折格子間隔に比例する。したがって、光ファイバの伸び縮みによって生じる λ_B の変化をモニタリングすることで、その FBG ゲージのひずみ変化を推定することができる。

光ファイバに近赤外線を入射し、反射光の波長変化を計測する装置はインテロゲータと呼ばれ、FBG センサの計測分解能は光ファイバの感度とインテロゲータの波長変化計測精度によって決まる。光ファイバのひずみに対する感度 k は、ブラッグ波長の変化量を $\Delta \lambda_B$ 、ひずみ変化を $\Delta \varepsilon$ とすると、

$$k = \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B \Delta \varepsilon} \quad (3)$$

と表される。FBG センサのひずみ感度の典型値は 7.8×10^{-7} [$1/\mu\varepsilon$] 注 1、インテロゲータの波長変化の計測

精度 $\Delta \lambda_{Bmin}$ は 1 pm 注 1 であるので、ひずみの計測分解能 $\Delta \varepsilon_{min}$ は、 $\lambda_B=1550$ nm のとき

$$\Delta \varepsilon_{min} = \frac{\Delta \lambda_{Bmin}}{7.8 \times 10^{-7} \lambda_B} = 0.83 \mu\varepsilon \quad (4)$$

と求まる。計測分解能をより高くするためには、光ファイバのひずみ感度 k を大きくする、もしくは波長変化の測定精度を上げるといった工夫が考えられる。本実験で用いたインテロゲータ (旧型 FBGS-SCAN800, ベルギー FBGS インターナショナル社製)、および FBG センサ (DTG-LBL-1550, ベルギー FBGS インターナショナル社製) の性能を表 2 にまとめる。

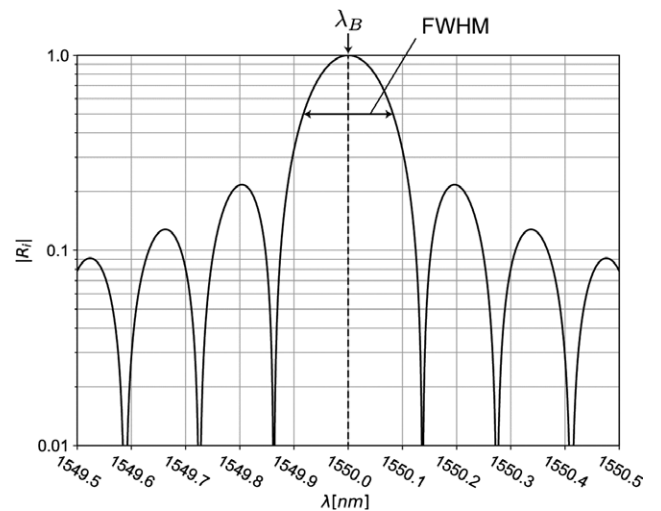


図 2 FBG ゲージの反射スペクトル (Kreuzer, 2006 図 6 を基に作成)

Fig. 2 Reflection spectrum of FBG gauge (modified from Kreuzer, 2006 Fig. 6).

注 1 : <https://fbgs.com/components> を参照。

表 2 インテロゲータ(旧型 FBGS-SCAN800)および FBG センサの計測性能(https://fbgs.com/components を参照)
 Table 2 Performance of interrogator (old model of FBGS-SCAN800) and FBG sensor.

インテロゲータ波長変化計測精度 Wavelength precision of interrogator, $\Delta\lambda_{Bmin}$	1pm
光ファイバひずみ感度 (典型値) Strain sensitivity of cable (typical), k	$7.8 \times 10^{-7}[1/\mu\epsilon]^*$
ひずみ計測分解能 Measurement resolution of strain, $\Delta\epsilon_{min}$	0.83 $\mu\epsilon$
ひずみ計測精度 Measurement accuracy of strain	1.7 $\mu\epsilon$
計測周波数 (1 チャンネルのみ使用の場合) Sampling frequency using single channel	2kHz ^{*2}
ひずみ計測範囲 Measurement range of strain	50000 $\mu\epsilon$ (5%)
光ファイバセンサ保護等級 Protection class of cable	IP68
光ファイバ外径 (コーティング含む) Diameter of cable with coating	0.2mm
光ファイバ曲げ半径 Bending radius of cable	R5mm
光ファイバ引張り強度 Tensile strength of cable	>50N

*1 The strain sensitivity of cable used in this study is 7.73×10^{-7} .

*2 The sampling frequency of current model (FBGS-SCAN80X) is 5 kHz with single channel.

FBG センサの多点計測は、複数の FBG ゲージにそれぞれ固有のブラッグ波長を割り当てることで実現される。したがって、厳密にはそれぞれの FBG ゲージで計測分解能が異なるため、測定するひずみの大きさに対して分解能が十分高いことが望まれる。

FBG センサの基本原理、温度に対する感度やひずみの温度補償については Kreuzer (2006) や石川 (2000) に、また FBG ゲージ区間内での不均一なひずみに対する反射スペクトルについては小野他 (2002) に詳しくまとめられている。

光ファイバを用いた地震波観測では、現在では散乱光を用いた distributed acoustic sensing (DAS) 計測が主流である(例えば Lindsey *et al.*, 2019; Ide *et al.*, 2021, Nishimura *et al.*, 2021)。その理由として、光ファイバを加工無しで利用でき、また地震動を検知するのに十分な感度を持っていることが挙げられる。DAS, FBG センサともに現在も開発が進められており、両者の性能を比較することは難しいが、DAS の空間分解能が通常 1-10 m (Parker *et al.*, 2014) であるのに対し、本研究で用いた FBG センサは FBG ゲージ長が 8 mm, 最小ゲージ間隔が 10 mm と高空間分解能であること、また FBG センサは光ファイバの軸ひずみに対する波長変化の線形性が良く、精度の良いひずみ計測が可能である点において室内岩石試験の計測に最適であるといえる。

3.2 断層面近傍のせん断ひずみの測定原理

軸ひずみの差分によるせん断ひずみの測定原理に

ついて、まず図 3 において座標軸を反時計回りに θ 回転させた時の応力は、

$$\begin{aligned} \sigma'_{xx} &= \sigma_{xx} \cos^2 \theta + \sigma_{yy} \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \sigma'_{yy} &= \sigma_{xx} \sin^2 \theta + \sigma_{yy} \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \tau'_{xy} &= (\sigma_{yy} - \sigma_{xx}) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{aligned} \quad (5)$$

と表される (Jaeger, 2012)。ただし系は平衡にあり、 $\tau_{xy}=\tau_{yx}$ とする。図 4 のように xy 軸に対して $\theta=45^\circ$ となるよう回転した軸を 1, 2 軸としたとき、その応力は式 (5) より

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2}\sigma_{xx} + \frac{1}{2}\sigma_{yy} + \tau_{xy} \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2}\sigma_{xx} + \frac{1}{2}\sigma_{yy} - \tau_{xy} \\ \tau_{12} &= \frac{1}{2}(\sigma_{yy} - \sigma_{xx}) \end{aligned} \quad (6)$$

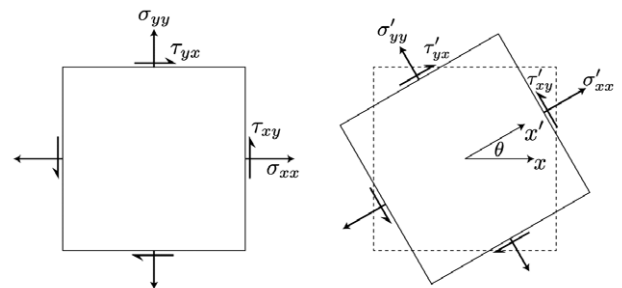


図 3 二次元応力テンソルとその座標変換
 Fig. 3 Two-dimensional stress tensor on the rotated coordinates.

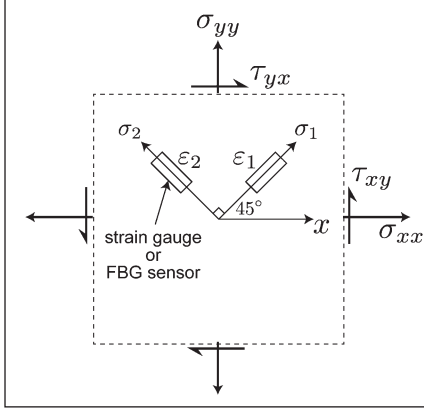


図4 直交座標に沿った軸ひずみの計測
Fig. 4 Measurement of axial strain along orthogonal axes.

と表される。

一方、1, 2 軸に沿って取り付けられたひずみゲージまたは FBG ゲージの測定値 (指示ひずみ) をそれぞれ $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ とし、平面応力を仮定するとその構成則は

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) \\ \gamma_{12} &= \frac{1}{G}\tau_{12}\end{aligned}\quad (7)$$

と表される。ここで E はヤング率、 ν はポアソン比、 G は剛性率である。式(6)を代入すると、

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E}\left\{\frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})(1 - \nu) + \tau_{xy}(1 + \nu)\right\} \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E}\left\{\frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})(1 - \nu) - \tau_{xy}(1 + \nu)\right\} \\ \gamma_{12} &= \frac{1}{2G}(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})\end{aligned}\quad (8)$$

となり、指示ひずみの差分を取ると

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{2(1 + \nu)}{E}\tau_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}\quad (9)$$

であるから、いかなる軸応力 σ_{xx}, σ_{yy} に対しても

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \gamma_{xy}\quad (10)$$

とせん断ひずみを推定できる。

一般的に、二測定点を y 軸に関して対称に貼り付けたとき、それぞれの指示ひずみは座標軸を θ および $180^\circ - \theta$ 回転させた時の 1 軸方向の軸ひずみから、

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E}[\sigma_{xx}(\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta) + \sigma_{yy}(\sin^2 \theta - \nu \cos^2 \theta) + \tau_{xy}(1 + \nu)\sin 2\theta]$$

$$\varepsilon_b = \frac{1}{E}[\sigma_{xx}(\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta) + \sigma_{yy}(\sin^2 \theta - \nu \cos^2 \theta) - \tau_{xy}(1 + \nu)\sin 2\theta]\quad (11)$$

と求められる。指示ひずみの差分を取ると、

$$\varepsilon_a - \varepsilon_b = \gamma_{xy} \sin 2\theta\quad (12)$$

となる。したがって、 $\theta=45^\circ$ のとき x 軸に平行な断層のせん断ひずみの計測感度が最大になる。二計測点が y 軸に対称でないときは差分からは断層面に沿ったせん断ひずみを取り出すことができないため、ひずみゲージおよび FBG センサの取り付け時には注意を要する。

3.3 FBG センサによるスティックスリップ実験のひずみ計測

本実験では、2 点の FBG ゲージを図 5 のように断層面に対して 45° になるように瞬間接着剤を用いて貼り付け、それぞれの軸ひずみを 2 kHz のサンプリング周波数で測定した。SGB15 に対して右側の FBG ゲージを OF-R、左側を OF-L と呼ぶ。FBG ゲージに割り当てられたブラッグ波長はそれぞれ 1535.000 nm, 1541.860 nm である。応力載荷時(fb03-029)、せん断摩擦試験時(fb03-030)での FBG センサとひずみゲージの比較を図 6 に示す。2 軸型ひずみゲージ(SGB15)は最も FBG センサに近く設置されているものの、その軸ひずみはブリッジ回路に組み込まれ、その差分しかモニターされていないため、軸ひずみを直接比較することはできていない。したがって、図 6 では FBG センサ近傍の 3 軸型ひずみゲージ(SGT15, SGT16)において対応する軸ひずみを比較している。本実験で用いたひずみのデータ収録装置は、ひずみ変化を 1 MHz で収録するとともに、1024 サンプル点ごとに逐次測定値を平均したダウンサンプルデータ($F_s=976.5625$ Hz)も収録する。図 6 のひずみゲージについては、ダウンサンプルデータを示している一方で、FBG センサについてはリサンプリングや平滑化等の後処理はせずに示している。また、実験中の室温は一定であり、すべりイベントによって生じる摩擦熱による岩石試料の温

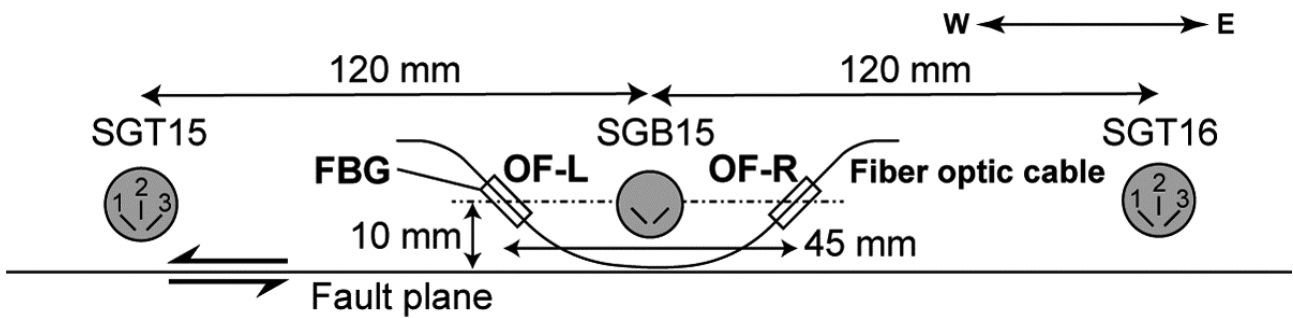


図5 上側岩石試料側面に取り付けられた光ファイバひずみセンサの寸法図。SGTは3軸型、SGBは2軸型ひずみゲージを表す。SGTに示されている番号(1-3)は軸ひずみの成分を表す。3軸型ひずみゲージは3方向の軸ひずみがそれぞれモニターされるのに対し、2軸型はどちらもブリッジ回路に組み込まれ、その差分(せん断ひずみ)のみがモニターされる。

Fig. 5 Strain gauges and FBG sensors installed on the side surface of the upper rock specimen. SGT and SGB indicate tri-axial and bi-axial strain gauges, respectively. The numbers (1-3) in the SGT indicate the components of axial strain. The axial strain along each axis is individually monitored in SGT, while SGB outputs only the difference of strain along two orthogonal axes as shear strain.

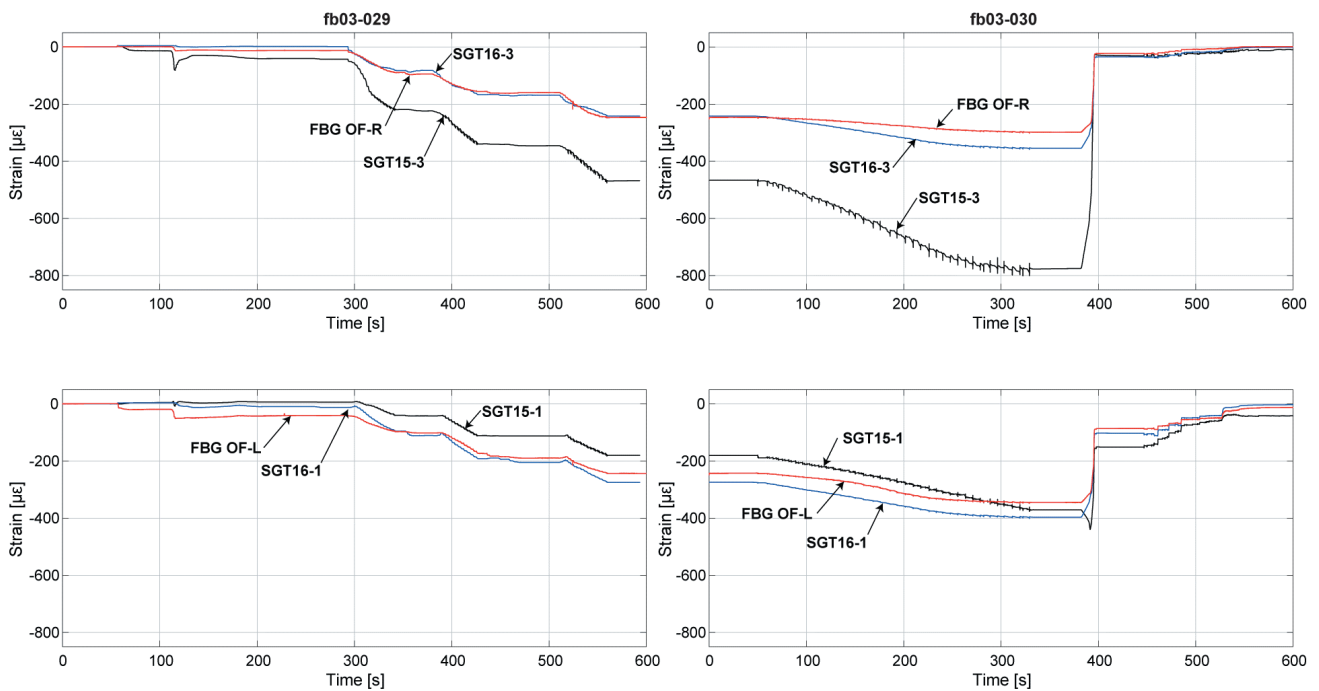


図6 応力載荷時(fb03-029)およびせん断摩擦試験時(fb03-030)のひずみ変化。OF-R、OF-LはSGB15に対してそれぞれ右側、左側のFBGセンサを表し、SGT15、SGT16に関しては三軸ひずみゲージの測定値のうち、OF-R、OF-Lと軸方向が一致する成分を示す。fb03-030において0-340秒までが摩擦試験中で、その後せん断荷重、垂直荷重ともに除荷されている。

Fig. 6 Time series of strain during experiments. fb03-029 and fb03-030 indicate the experimental index for pre-loading and the stick-slip experiment, respectively. OF-R and OF-L indicate the FBG sensors installed on the right and left side of SGB15. The axial strains of SGT15 and SGT16 are compared to the FBG sensors with respect to each component. The stick-slip experiment is conducted during 0-340 seconds in fb03-030, followed by the removal of shear and normal loading.

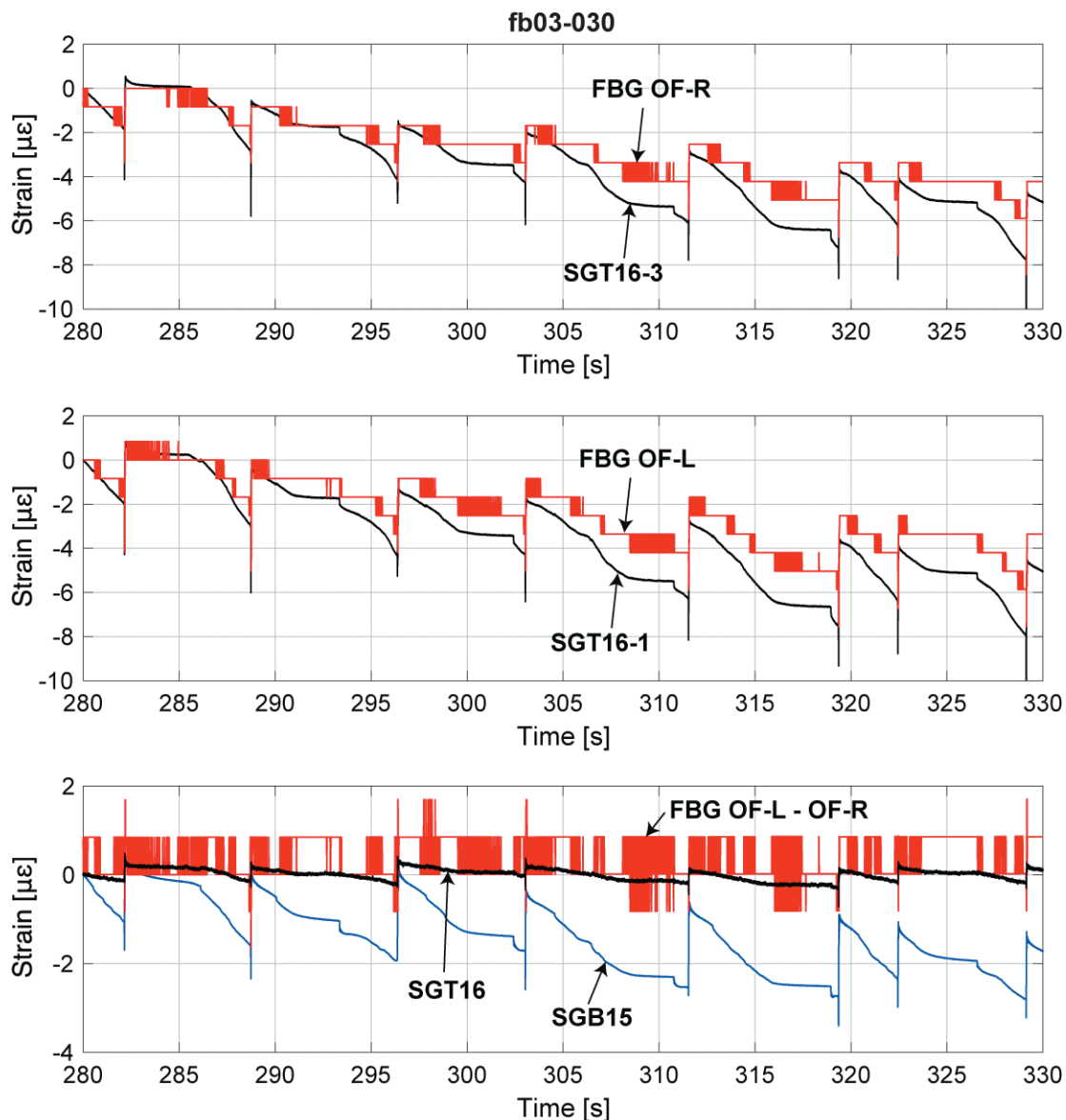


図7 スティックスリップ時のひずみ変化について、ひずみゲージとFBGセンサの比較。上段、中段は各軸ひずみを、下段は軸ひずみの差分をとったせん断ひずみを表す。

Fig. 7 Comparison of strain change between strain gauges and FBG sensors during stick-slip. Top and middle panels show the comparison of axial strain, while the bottom shows the shear strain inferred from FBG sensor and strain gauges.

度変化も僅かであるため、本解析ではひずみゲージ、FBGセンサ共にひずみ測定値の温度補償は行っていない。

この図から、FBGセンサが垂直・せん断荷重の载荷に伴う岩石試料の長期的なひずみ変化を計測できていることがわかる。また、ひずみ値はSGT15よりSGT16の方がよく合致しており、これは後のすべりイベント発生時の短期的なひずみ変化の比較においても同様であった。

fb03-029で垂直・せん断荷重の载荷が完了した後、fb03-030においてせん断荷重を少しずつ増加させるとせん断応力が蓄積され、それが摩擦面の不安定すべりによって解放されることを繰り返すスティックスリップ現象が生じる。このスティックスリップ時のひずみ変化を図7に示す。図6と同様に、ひずみゲージに関してはダウンサンプルデータを示している。ひずみの急激な変化は、摩擦面の不安定すべりに対応している。軸ひずみに関してはより相関の高

かった SGT16 の軸ひずみとの比較を示し、せん断ひずみについては SGT16-1 と SGT16-3 の差分に加え SGB15 も合わせて比較している。FBG センサの計測分解能が $0.83 \mu\epsilon$ であることから計測値が滑らかではないものの、FBG センサが示すひずみ変化はひずみゲージとよい相関を示している。2 軸の差分を取ったせん断ひずみでは、FBG センサにより近い位置に取り付けられた SGB15 との相関が高いと予想されたが、実際は SGT16 から推定されたせん断ひずみとの相関の方が良くなった。この原因として、

1. FBG センサの取り付け角度が完全に対称ではなかった。
2. FBG センサの二観測点が 2 軸型ひずみゲージ (SGB15) を挟んで離れているため、ひずみの空間不均質がその差分に影響した。
3. ひずみゲージの測定値が測定点間で数倍程度のばらつきを示している (図 8) ことから SGB15 がせん断ひずみを過大評価しているか、もしくは実際に SGB15 の点で局所的にせん断ひずみが大きかったものの、瞬間接着剤を用いた光ファイバの岩石とのカップリングが不十分であったため FBG センサがせん断ひずみ変化を過小評価している。

といった可能性が挙げられる。摩擦面のすべりによるひずみ変化を十分に測定できるよう FBG センサの接着位置と接着方法に関してさらなる検討が望まれる。

図 7 中の 1 回のすべりイベント時に関するひずみ波形の比較を図 9、またその拡大図を図 10 に示す。ひずみゲージの波形は高サンプリング (1 MHz) のものとダウンサンプリングしたもの (976.5625 Hz) をそれぞれ HFS, LFS とし、FBG センサによって計測されたひずみと比較する。

本実験で得られた FBG センサのイベント波形はひずみゲージに対して約 15 ms の遅れが生じていた。これは FBG センサのサンプリング周波数を考慮すると約 30 サンプル分の遅れとなるが、これが FBG センサの位相特性によるものなのか、収録時のひずみゲージと FBG センサとの同期に問題があったのか不明であった。したがって、本実験の結果から FBG センサの位相特性については言及できず、図 9、図 10 では、その遅れをあらかじめ補正したものを比較している。

図 9 のひずみゲージの HFS 波形から、すべりに伴う瞬間的なせん断ひずみ振幅は最大 $20\text{--}50 \mu\epsilon$ であることがわかる。LFS 波形では、その振幅はダウンサンプリングの過程で平滑化される一方で、FBG センサの波形にはそのようなパルスは収録されていなかった。

図 10 は図 9 を拡大した、ひずみ波形の詳細な比較を示す。ひずみゲージのノイズレベルは、すべり前後のひずみ変化を計測するにあたっては十分小さいが、ミリ秒スケールでの滑らかなひずみ変化を議論する際は平滑化が必要である。滑らかなひずみ変化を得るためには、本データの LFS 波形のように、HFS 波形の時間窓平均を取るといった高周波ノイズの除去が必要である。一方で、FBG センサはそのようなノイズ除去をすることなく滑らかなひずみ変化が得られた。FBG センサは、その計測分解能が断層すべり時のひずみ変化に対して十分ではないものの、LFS 波形で得られたミリ秒スケールの滑らかなひずみ変化と調和的であった。

本実験から、岩石試料の準静的なひずみ変化や、すべりイベント時のミリ秒スケールの滑らかなひずみ波形を FBG センサで計測できることがわかった。また、低サンプリングであってもすべりイベント時のひずみ変化を高い S/N 比で計測できることが示された。今後は、すべりイベントで生じるひずみ変化をより精度よく計測するために、FBG センサの計測分解能を改善すること、またその位相特性を明らかにすることが課題となる。

4. 加速度センサを用いた下部岩石試料の変位推定

次に、下側岩石試料の断層面下部に取り付けた加速度センサによる計測結果と、その二階積分によるすべりイベント時の下部岩石試料の変位推定に関してまとめる。実験に用いた加速度センサの仕様を表 3 に示す。本実験で用いた 4 つの加速度センサについて、MEMS 3 軸型を MEMS3、MEMS 1 軸型を MEMS1、圧電式 1 軸型 (水晶材) を PZ1、圧電式小型 1 軸 (セラミック材) を PZ1S と記す。それぞれの加速度センサを図 11 に示すように摩擦面直下に取り付け、断層のすべり方向と平行な加速度成分を計測した。また加速度センサの近傍に GAP センサを取り付け、下部試料と上部試料の相対変位 (すべり量) を測定した。

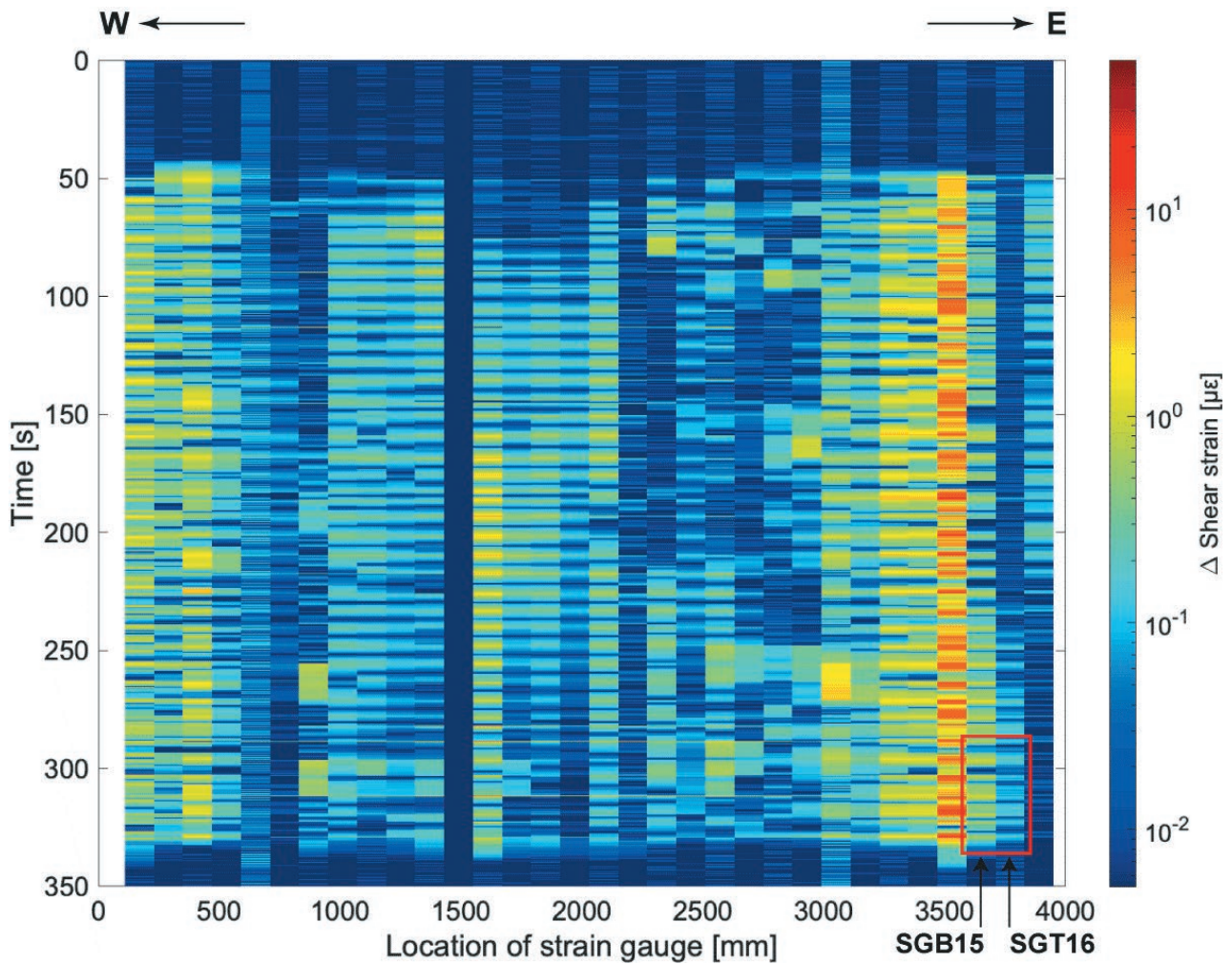


図 8 fb03-030 でのひずみゲージ (SGB, SGT) 計測によるスティックスリップ時のひずみ変化。横軸は西側の断層端からひずみゲージまでの距離、縦軸は実験開始からの経過時間を表す。不安定すべり時におけるせん断ひずみ変化を取り出すため、各ひずみゲージのデータからオフセットを除去した後、さらに 10 秒窓の中央値平滑化フィルタを適用し推定した長周期ノイズを取り除いた。FBG センサとの比較に用いた SGB15 と SGT16 について、図 7 に対応する時間窓を図中の赤枠で示す。水平方向に見られる筋が不安定すべりによる急激なひずみ変化である。

Fig. 8 Strain change during stick-slip measured by strain gauge (SGB and SGT) array installed along the fault in fb03-030. The horizontal axis indicates the distance of SGB and SGT strain gauges from the west edge of rock specimen. The vertical axis shows the time from the start of experiment. We removed the offset and low-frequency noise estimated using moving median filter with the window length of 10s from the strain time series to extract the strain change associated with slip events. The time window associated with Fig. 7 on the SGB15 and SGT16 is indicated with red box. The horizontal stripes are corresponding to sudden change in shear strain due to the unstable slip on the fault.

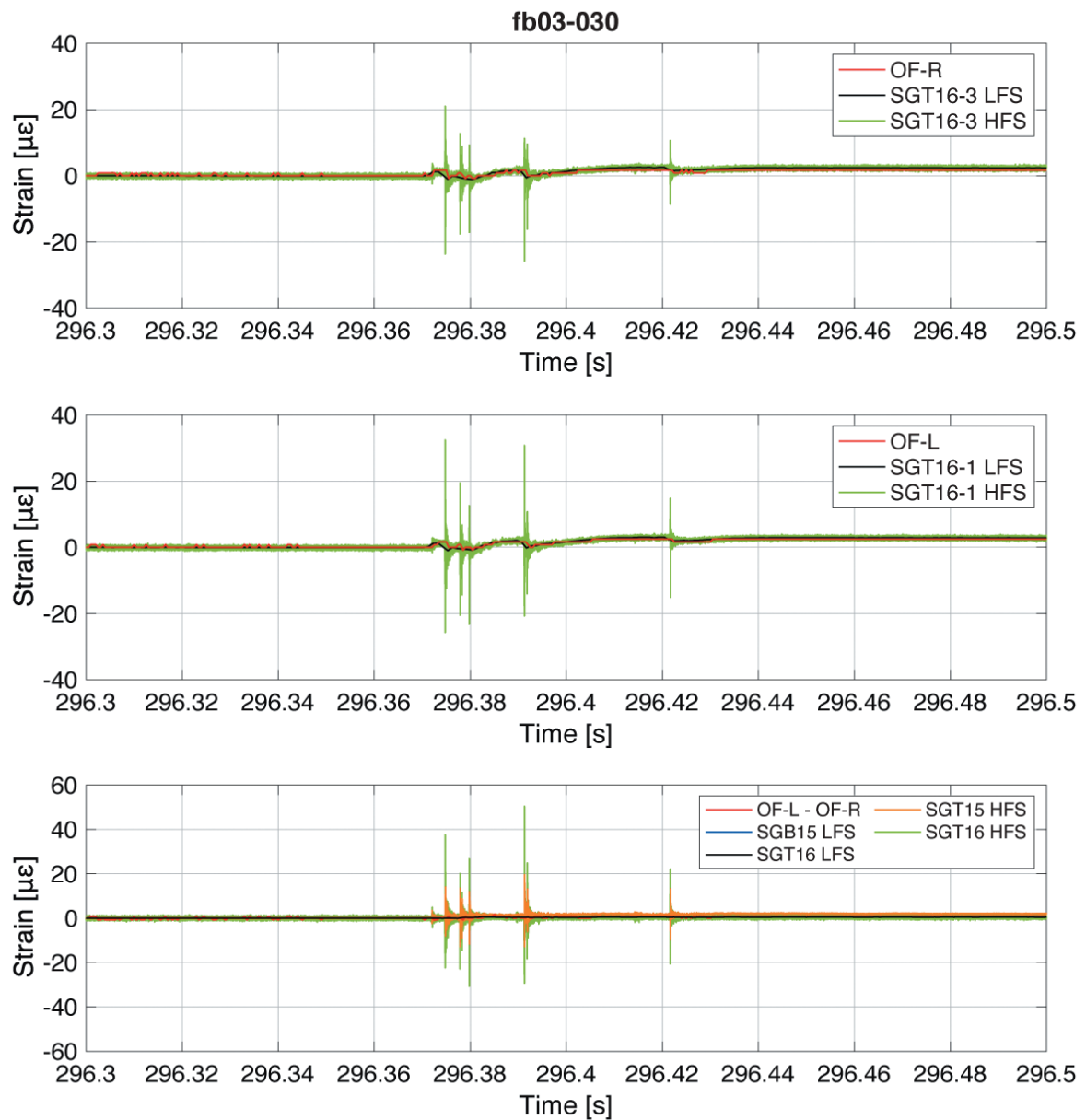


図 9 あるすべりイベント時のひずみ変化。LFS, HFS はそれぞれ 976.5625 Hz, 1 MHz のサンプリング周波数によるひずみゲージの計測値である。図 7 と同様に、上段、中段は各軸ひずみを、下段はせん断ひずみを比較している。各成分はこの時間窓中の最初の 10 点の平均値でそれぞれのオフセットを取り除いている。

Fig. 9 Strain change associated with a slip event. LFS and HFS indicate the low and high frequency sampling (976.5625 Hz and 1 MHz) of the strain gauge, respectively. The same as Fig. 7, top and middle panels show the comparison of axial strain, while bottom shows the shear strain. The offset of strain is removed using the mean of the first 10 points with respect to the strain components.

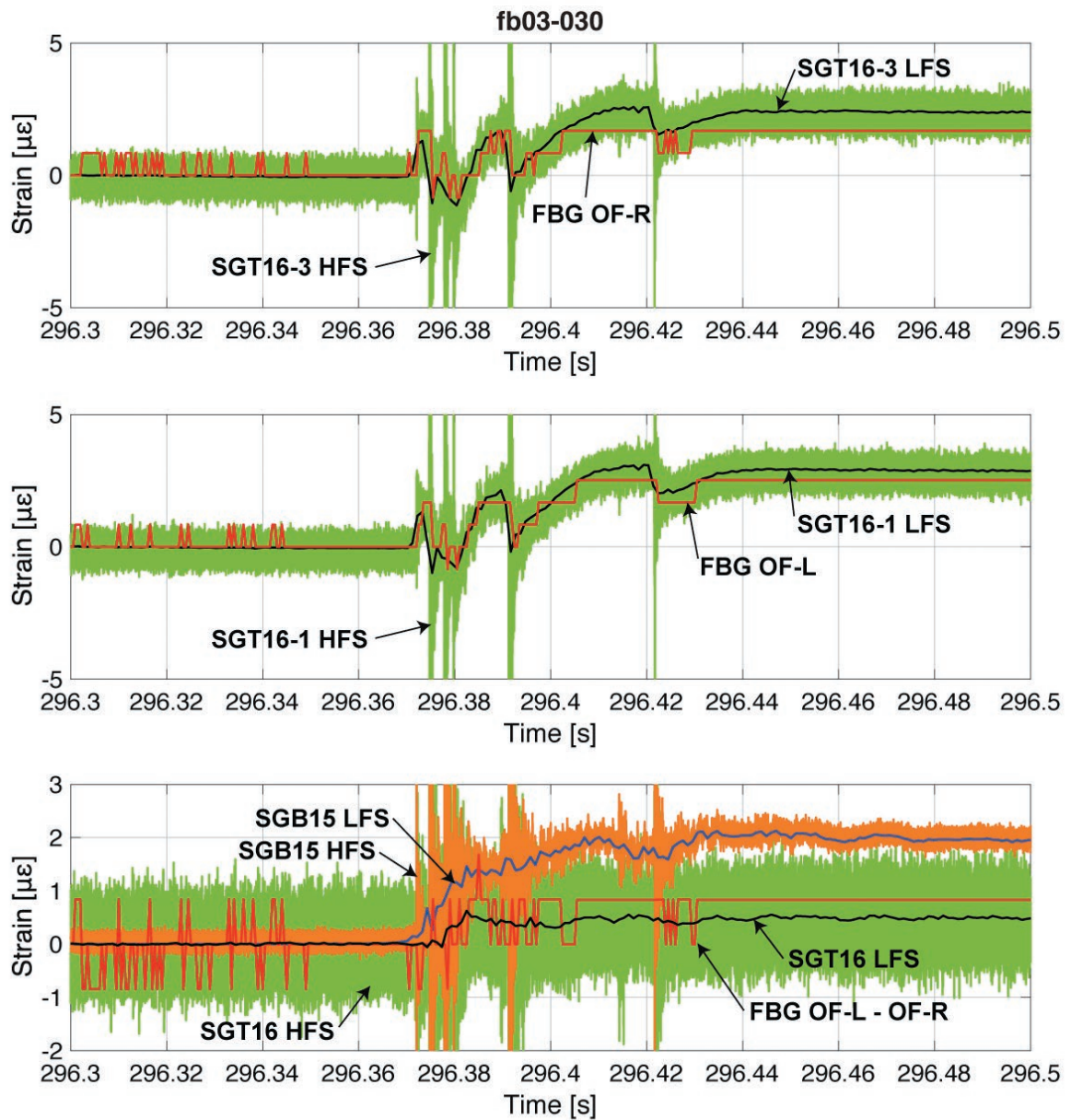


図 10 図 9 の拡大図。本結果は FBG センサについて一律 15 ms の時間遅れが補正されているため、ひずみゲージとの位相差については議論できない。下段のひずみゲージ SGB15, SGT16 の高サンプリングデータ (HFS) について、そのノイズの標準偏差はそれぞれ $0.07 \mu\epsilon$ および $0.4 \mu\epsilon$ である。

Fig. 10 Enlarged view of Fig. 9. Around 15 ms delay in FBG sensor to the strain gauge is observed due to uncertainty in phase response and/or sampling condition associated with FBG sensor, which is removed for the sake of comparison. The standard deviation of noise level associated with high frequency sampling of SGB15 and SGT16 are $0.07 \mu\epsilon$ and $0.4 \mu\epsilon$, respectively.

表 3 実験に用いた加速度センサの性能
Table 3 Performance of accelerometers used in this study.

機器名 Name of sensor	型番 Model number	測定範囲 (m/s ²) Measurement range of acceleration	周波数範囲 (Hz) Measurement range of frequency	重量 (g) Weight of sensor
MEMS 式 3 軸型 (MEMS3) MEMS triaxial accelerometer	3713B112G	20	0-250	17.3
MEMS 式 1 軸型 (MEMS1) MEMS uniaxial accelerometer	3711D1FA200G	2,000	0-2,000	16.3
圧電式 1 軸型 (水晶材, PZ1) Piezoelectric uniaxial accelerometer (Quartz)	353B15	5,000	1-10,000	2.0
圧電式小型 1 軸型 (セラミック材, PZ1S) Piezoelectric uniaxial small accelerometer (Ceramic)	352A25	20,000	1-10,000	0.6

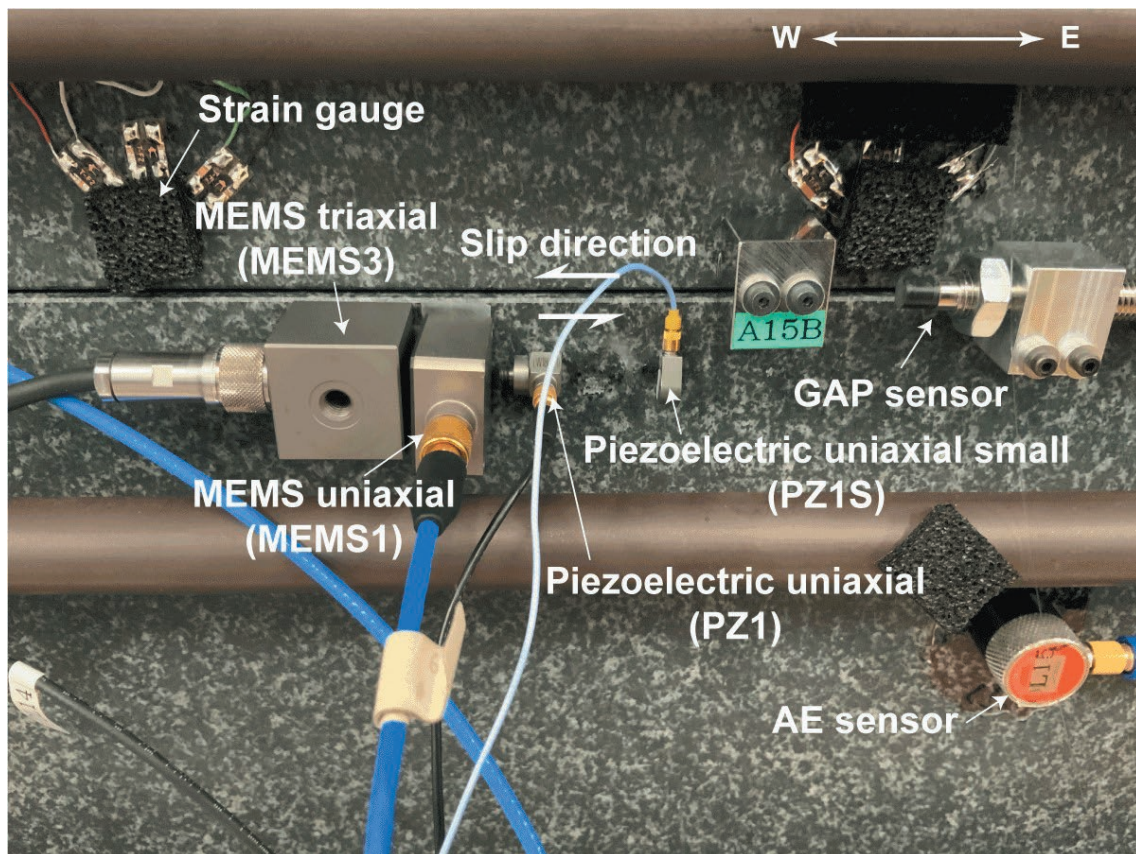


図 11 加速度センサの接着状況. 3 軸, 1 軸型加速度センサともに断層と平行な加速度成分を計測する.
Fig. 11 Installation of accelerometers. Both tri- and uni-axial accelerometers record the acceleration parallel to the fault.

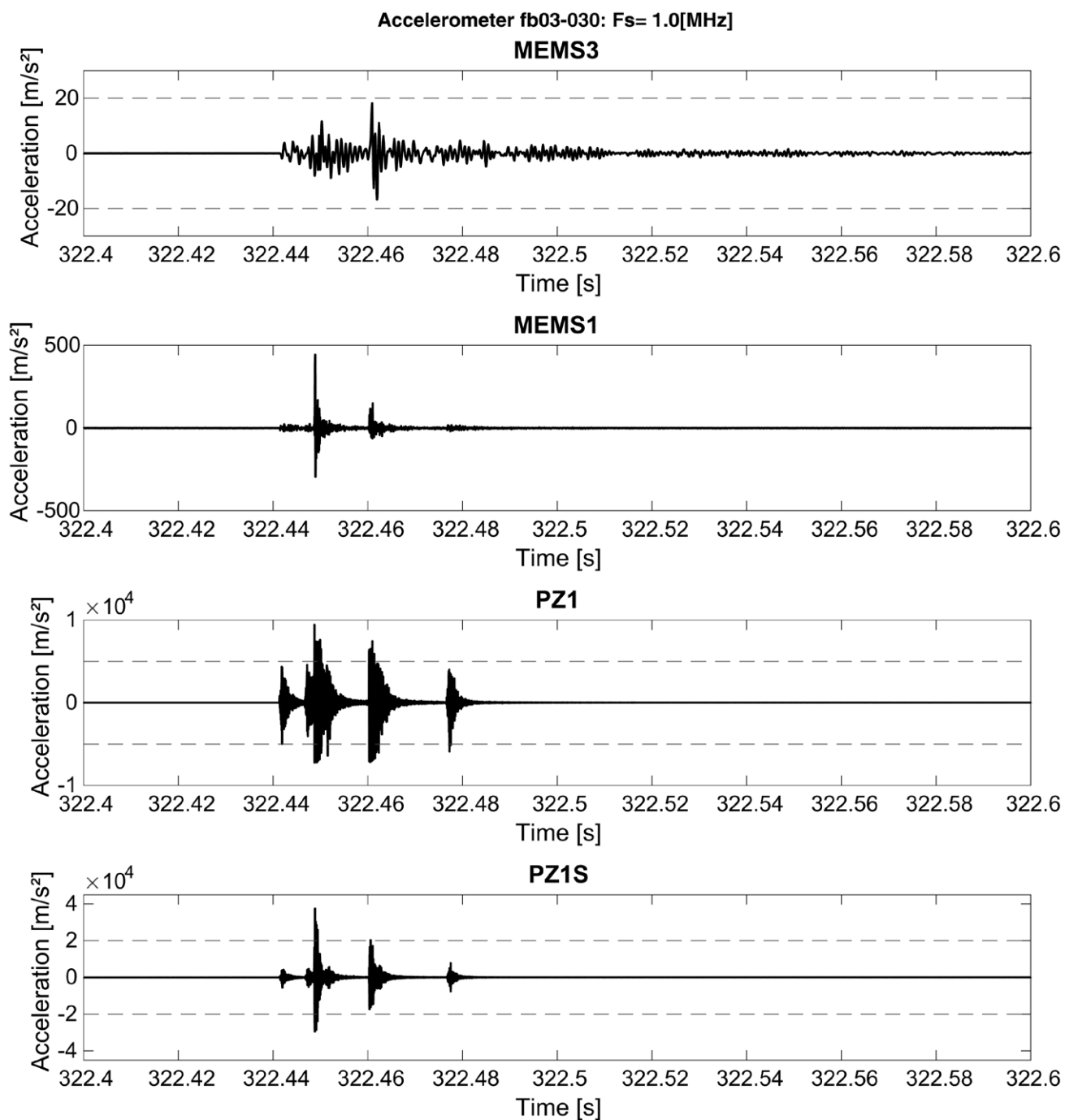


図 12 各加速度センサで収録された加速度波形。サンプリング周波数は 1 MHz である。破線はセンサごとの許容加速度を示す。PZ1, PZ1S において測定値が許容加速度を超えていることがわかる。

Fig. 12 Time series of acceleration associated with a slip event with sampling frequency of 1 MHz. Dashed lines indicate the measurement range. PZ1 and PZ1S are overloaded in this event.

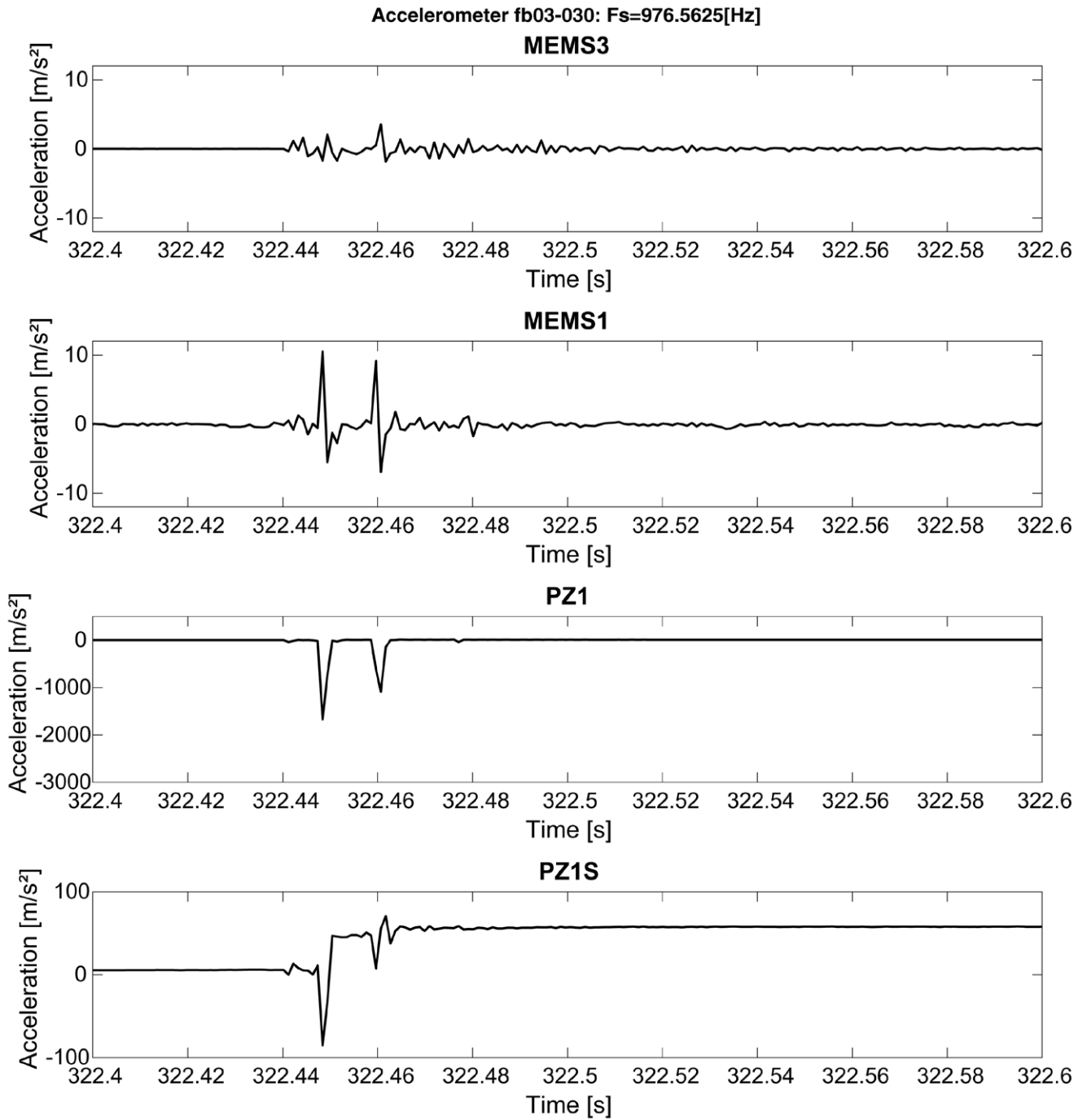


図13 1024 サンプル点ごとに逐次測定値を平均しダウンサンプリングされた加速度波形(Fs = 976.5625 Hz)
Fig. 13 Decimated waveform of acceleration with averaging over every 1024 samples (Fs=976.5625 Hz).

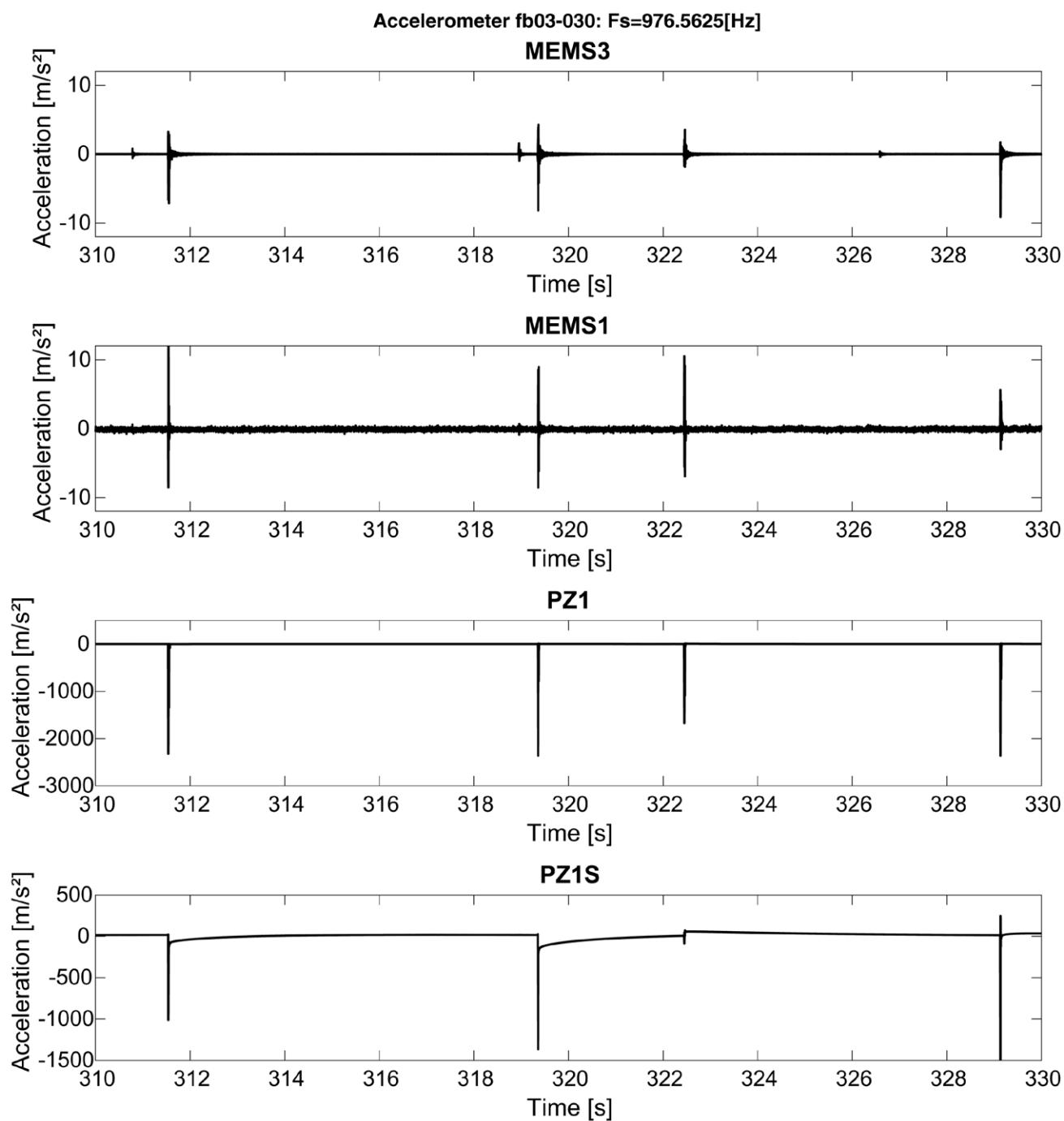


図 14 スティックスリップ中の複数回のすべりイベントについての加速度波形. PZ1S においてすべりイベント後、長い時間をかけて加速度のオフセットが回復するオーバーロード発生時に特有の挙動が見られる.

Fig. 14 Acceleration during stick-slip events. The offset of acceleration recovers for long time due to the electric discharge following the slip event in PZ1S, which is the signature of overload.

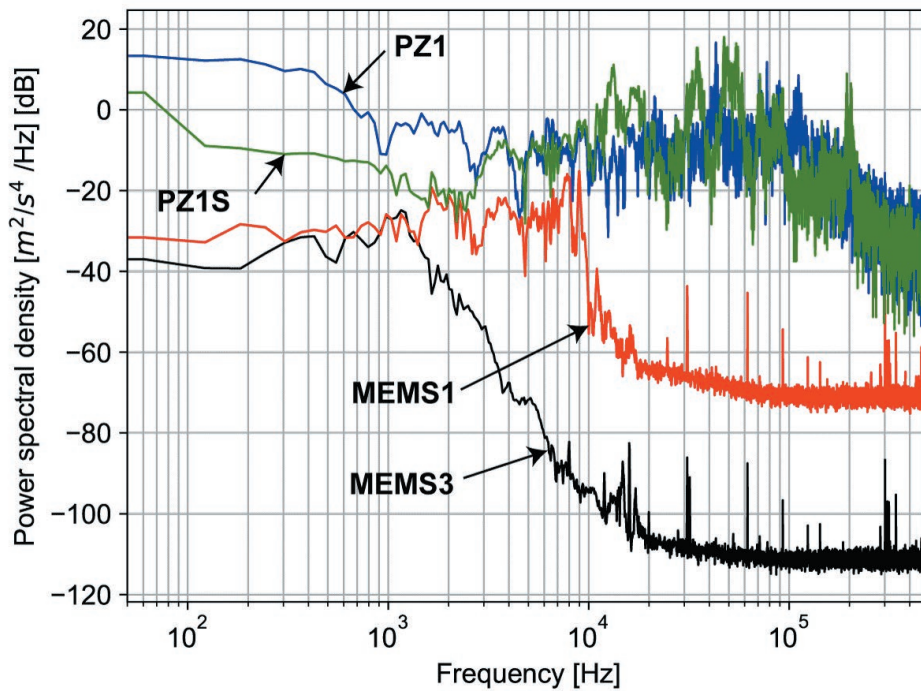


図 15 すべりイベント時の加速度波形のパワースペクトル密度。圧電式加速度センサでは 10 kHz を超えるシグナルが収録されており、これが PZ の共振利得による増幅のためにオーバーロードに寄与したと考えられる。

Fig. 15 Power spectrum density of acceleration associate with a slip event. High-frequency components more than 10 kHz are recorded in PZ, which could cause the overload due to the amplification of its frequency response.

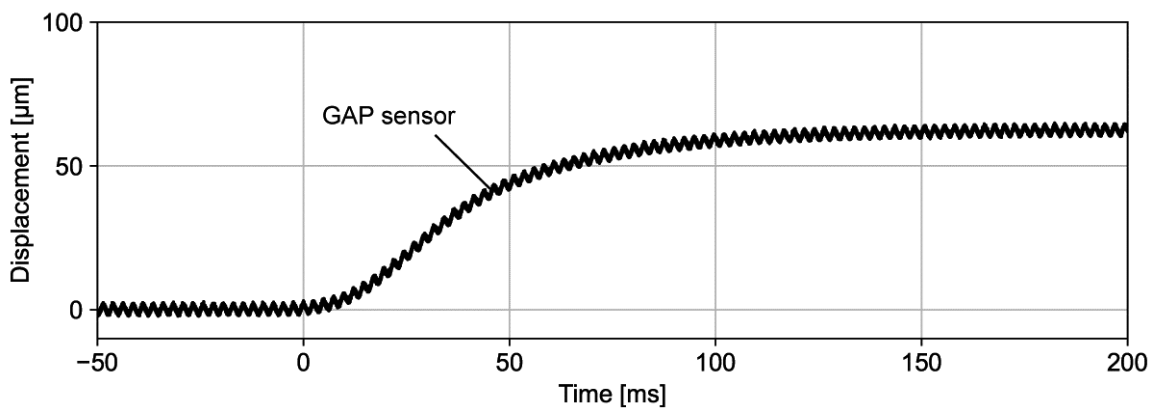


図 16 GAP センサによって計測されたすべりイベント時の断層面の相対変位

Fig. 16 Relative displacement on the fault during a slip event measured with GAP sensor.

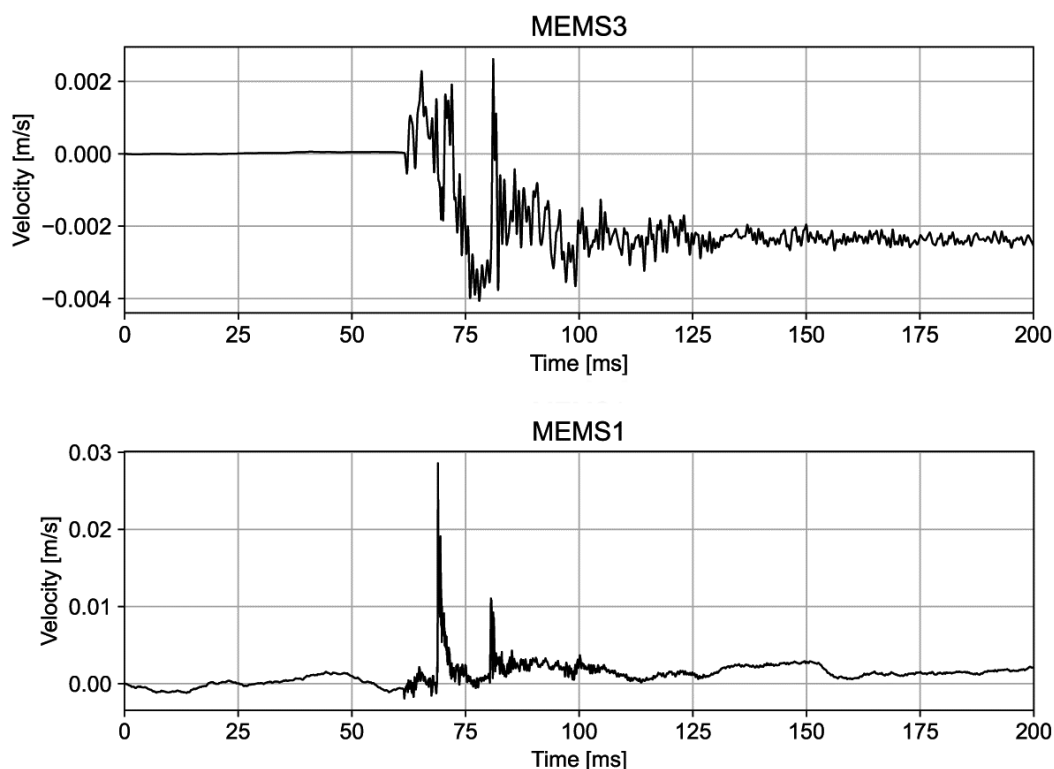


図 17 加速度波形の時間領域での一階積分による速度波形の推定. 上図が MEMS3, 下図が MEMS1 の加速度波形から推定された速度波形である.

Fig. 17 Velocity waveforms associated with a slip event inferred from the time-integral of acceleration measured with MEMS3 (top) and MEMS1 (bottom), respectively.

4.1 すべりイベントの加速度波形

4 つの加速度計で計測されたすべりイベント時の加速度波形を図 12 に示す. それぞれのサンプリング周波数は 1 MHz である. 4 つの波形は全て同じすべりイベントのものであるが, 加速度センサごとに異なる波形が記録された. これはセンサごとに共振特性が異なるためであると考えられる. また, PZ1, PZ1S は最大振幅が加速度センサの測定範囲を超えていた. これはオーバーロードと呼ばれ, 圧電式の加速度センサで発生すると大きな電荷信号が生じ, それが長い時間をかけて放電される特有の挙動を示す. 一方で, MEMS 式加速度センサは, その共振特性が圧電式加速度センサと異なるため, MEMS3, MEMS1 で得られた波形は測定範囲内に収まった.

図 13 は, 図 12 の波形をダウンサンプルしたもの ($F_s=976.5625$ Hz) を示す. 前章のひずみゲージと同様に, データ収録時に 1024 サンプル点ごとに逐次平均値を求め, ダウンサンプル波形を生成している.

データ点の平均による平滑化の影響で見かけの最大振幅が小さくなっている. したがって, オーバーロードしているかどうかを判別するためには, 振幅のピークを解像できる高サンプリング波形を確認する必要がある.

図 14 は, 複数のすべりイベントについての加速度波形 ($F_s=976.5625$ Hz) を示す. 特に PZ1S において, すべりイベント後に数秒にわたる対数関数型のトレンドが生じており, これが前述したオーバーロード発生時に特有の挙動である. オーバーロードした PZ1, PZ1S の加速度波形はこの長期トレンドを有することに加え, オーバーロードした直後のセンサが加速度に対してどのような応答を示すのか明らかでなく, その補正は困難であることから次項の変位推定には用いないこととした.

次に, 加速度波形のパワースペクトルを図 15 に示す. MEMS 式加速度センサについて, 仕様上の測定周波数範囲は MEMS3 が 250 Hz, MEMS1 が

2 kHzであったが、実際はそれぞれ 1.5 kHz, 10 kHz までの成分を含んでいた。一方で、圧電式加速度センサでは、測定範囲の 10 kHz を超えるシグナルが含まれており、この高周波成分が PZ の共振利得によって増幅し、オーバーロードに寄与したと考えられる。

図 16 は GAP センサによって測定されたすべりイベント時の断層面の相対変位 ($F_s=1$ MHz) を表す。これは高サンプリング波形のため、ひずみゲージや加速度センサのダウンサンプル波形で行った時間窓平均は行っていない。不安定すべりによって岩石試料の摩擦面が全てすべるイベントの場合、一回につき 60~100 μm の相対変位が生じる。GAP センサの測定値は 100 ms 以上のなだらかな変化を示しているが、図 12 の加速度波形より、実際にはすべりは 30-40 ms の間に複数回パルス状に生じたと考えられる。したがって、本実験での GAP センサによる測定はすべりイベント時の詳細なすべり履歴を平滑化し、すべりの応答に遅延を生じていると考えられる。また、すべり波形全体には 400 Hz の周期的なノイズも含まれている。これらの原因について、今後 GAP センサの応答やスラスト変換機を調べる必要がある。

4.2 MEMS1 によって測定された加速度波形を用いた変位推定

本解析では、オーバーロードしていない MEMS 式加速度センサによって測定された加速度を二階積分し、下部岩石試料の変位推定を試みる。岩石摩擦実験では、地震断層と同様に上部試料と下部試料の相対変位を摩擦面でのすべりとして、その摩擦構成則を解析することが研究目的の 1 つである。しかし、本実験では加速度センサは下部試料のみに取り付けられているため、本項で求める変位は GAP センサで測定されている岩石試料間の相対変位ではなく下部試料の絶対変位である点に留意する。

図 12 のすべりイベントに関して、加速度波形の時間領域での一階積分から推定された速度波形を図 17 に示す。MEMS3 は MEMS1 に比べてすべり後にオフセットがあり、これは変位を推定する際に線形トレンドを生じる原因となる。MEMS3 のオフセットを選択的に取り除いてから変位を推定することも可能ではあるが、すべり前後のオフセットがより小さい MEMS1 の方が、すべり前後で岩石試料がほぼ静

止していることを表している点で合理的であると考え、MEMS1 の加速度波形を用いた変位推定を行う。

本解析ではイベントごとの MEMS1 加速度波形に対して一律の処理過程でロバストに変位を推定できるように、下記の手順で波形処理を行なった。

- I. 加速度波形からすべりイベント部分を大まかに切り出す。加速度にオフセットがあると速度波形に線形トレンドが出るため、波形の最初の 20 ms の平均値をオフセットとし、取り除く(図 18a)。
- II. 加速度波形から最終変位を求める際にイベントの終了時刻が大きな影響を持つ。これを複数のイベントについて一律の規準で定めるために ObsPy (Beyreuther *et al.*, 2010) に実装されている recursive STA/LTA (Withers *et al.*, 1998) を用いてイベントの開始点と終了点を求める。STA, LTA の時間窓の長さはそれぞれ 5ms, 20ms とし、特性関数の閾値はそれぞれイベント開始を 3.0, イベント終了を 0.5 とした(図 18b)。また、イベントを切り出す際にはここで求めたイベント開始・終了点からさらに 1 ms 広くイベント窓を定めた。
- III. 時間領域で台形公式を用いて積分し、速度波形を求め、その後スプライン補間を用いて変位の過小・過大評価につながる長周期トレンドを除去する^{注 2}(図 18c)。
- IV. トレンドを除去した速度波形に移動平均フィルタをかけて平滑化する。矩形窓の長さが変位の時間解像度に影響するため、解像度を損なわないよう本解析では矩形窓の長さを 1 ms とした(図 18d)。
- V. 速度波形のイベント部分を切り出し、イベント窓の最小値をオフセットとし取り除く。これは、下部試料がせん断荷重の载荷方向と同じ向きにしか動かないという仮定を置くことを意味する。オフセットを取り除いた後、イベント窓中にコサインテーパーをかける。テーパーの幅はイベント開始側を 1 ms, またイベント終了側はすべりのパルスが通過した後の速度波形の擾乱を抑えるために 6 ms とした。(図 18e)。

注 2 : obspy.signal.detrend.spline を使用

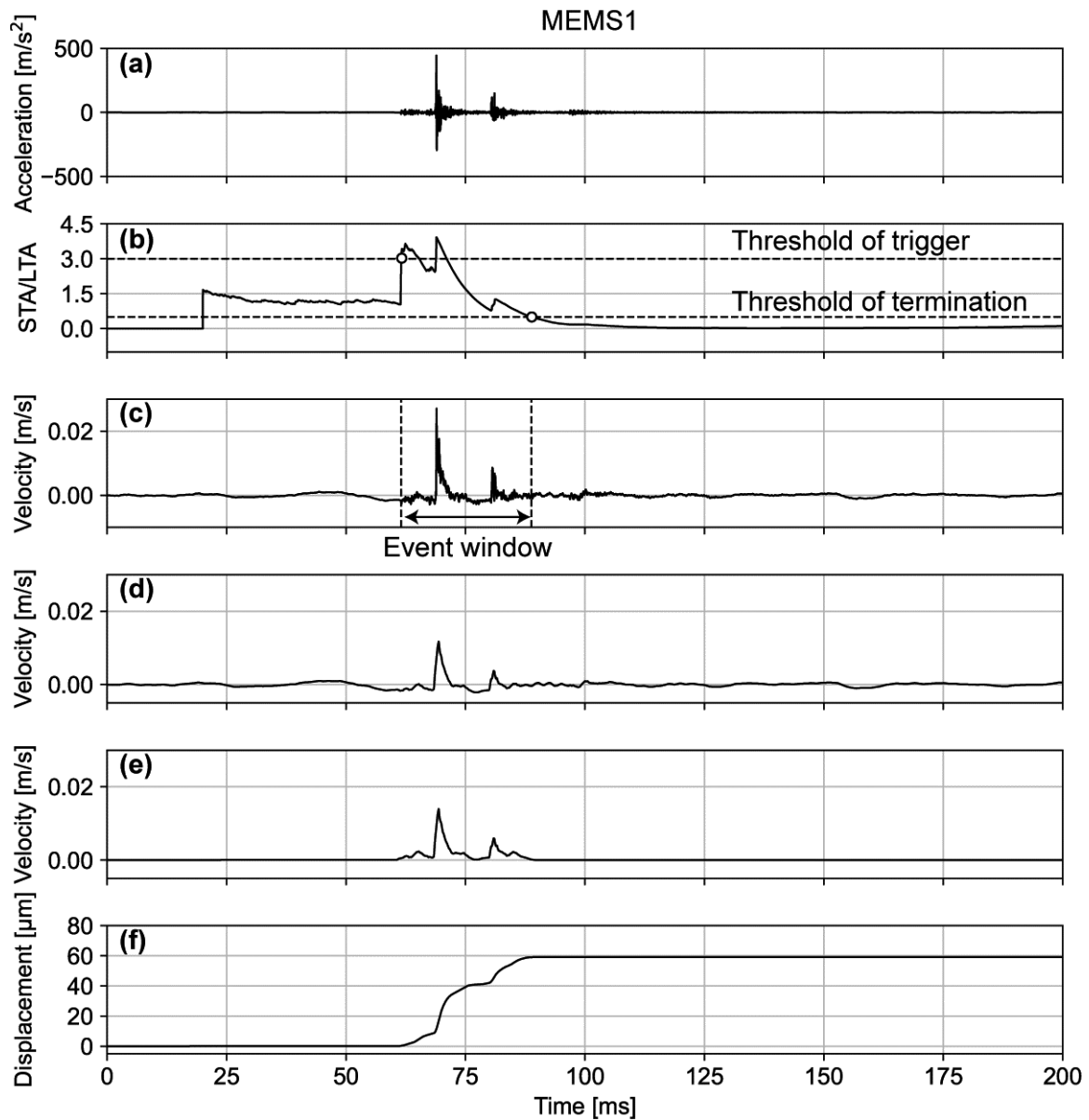


図 18 MEMS1 によって収録された加速度波形の二階積分による変位推定の処理過程. (a) 図 12 のイベントについて、オフセットを取り除いた後のイベント加速度波形. (b) recursive STA/LTA によるイベント時間窓の決定. $t=20$ ms における STA/LTA の不連続は、最初の LTA 分の時間窓について STA/LTA をゼロとしているために生じている. (c) 加速度を時間領域で積分し、スプライン補間を用いて長周期トレンドを除去した後の速度波形. (d) 1 ms 窓の移動平均フィルタをかけた後の速度波形. (e) イベント区間を切り出し、オフセットを取り除いた後コサインテーパをかけた速度波形. (f) 速度波形を時間領域で積分して推定した変位.

Fig. 18 Process flow to convert the acceleration measured with MEMS1 to the co-seismic displacement . (a) The acceleration waveform of the stick-slip event in Fig. 12 after the removal of offset. (b) The event window determined using recursive STA/LTA. The discontinuity at $t=20$ ms is caused due to the skipping of first LTA window. (c) The time history of velocity obtained with integration of the acceleration in time domain. The trend is removed from the velocity using spline fitting. (d) The velocity after applying moving-average filter with the window length of 1ms. (e) The trimmed velocity after removing the offset and applying cosine taper on the event window. (f) The time history of displacement obtained with integration of the pre-processed velocity in time domain.

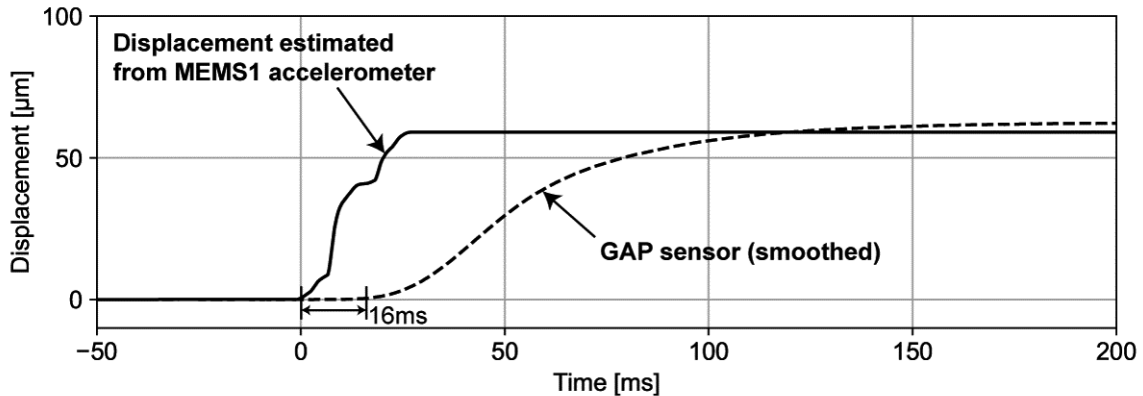


図 19 MEMS1 によって収録された加速度波形を用いて推定したすべりイベント時の変位と GAP センサとの比較。加速度波形から推定された変位は下部岩石試料のみの運動であるのに対し、GAP センサは断層面の相対変位を測定していることに留意する。GAP センサに関して、短周期ノイズを取り除くため移動平均フィルタを適用している。このイベントでは、GAP センサの変位の立ち上がりが約 16ms 遅れていた。

Fig. 19 Comparison of co-seismic displacement inferred from MEMS1 to the slip measured with the GAP sensor. Note that the accelerometer provides the motion only of the bottom rock specimen, while GAP sensor measures the relative displacement across the fault. We apply moving average filter on the GAP sensor to remove the high-frequency noise. The latency of gap sensor is around 16ms.

VI. 速度波形を再び時間領域で積分して変位を求める (図 18f)。

4.3 推定された変位と GAP センサとの比較

前述の処理過程により加速度波形から推定された下部試料の変位と、GAP センサの比較を図 19 に示す。すべり面の相対変位と下部試料のみの変位を比較しているため、その絶対量は一対一比較できないが、MEMS1 の加速度波形から推定した変位は GAP センサによって測定された相対変位と良い相関を得た。また、GAP センサに対して加速度センサから推定された変位は立ち上がり早い、これは GAP センサの応答が遅延しているためと考えられる。すべりが数十ミリ秒で立ち上がるのは過去の実験結果と調和的である。このイベントで、MEMS1 による変位の推定値が GAP センサより僅かに小さくなった要因として、すべり面の相対変位について下部試料の絶対変位が支配的であるものの、上部試料の変位も僅かに相対変位に寄与していることが考えられる。

他のすべりイベントに対して同じ処理過程を用いて推定した変位を図 20 に示す。STA/LTA の閾値や

平滑化等の処理パラメータを固定しても、多くのすべりイベントについて GAP センサで測定された相対変位に近い絶対変位をロバストに推定することができた。これは、図 18 のイベントと同様に、本試験機では下部試料の変位がすべり面の相対変位の大部分を占めていることを示唆している。

しかし詳細に変位の差をみると、図 18 のイベントとは異なり、MEMS1 による変位の推定値は図 20 のどのイベントにおいても GAP センサの測定値より大きくなり、特に図 20f のイベントに関してはその差が顕著となった。その原因として、ステップ V において速度が常に正となる仮定を置いて行ったオフセット補正が挙げられる。この仮定は、MEMS1 を用いて推定した下部試料の変位が単調増加することを意味している。しかしながら、仮に下部試料が一時的にせん断荷重の载荷方向と逆向きに運動していた場合、すなわち速度が負であった場合は、イベント窓の最小値をオフセットとしているため速度および変位を過大評価してしまい、図 20 で示された差が生じた可能性がある。実際に、本試験機はスティックスリップ中のせん断応力の蓄積・解放過程が断層面において空間的に不均質であるため、必ず

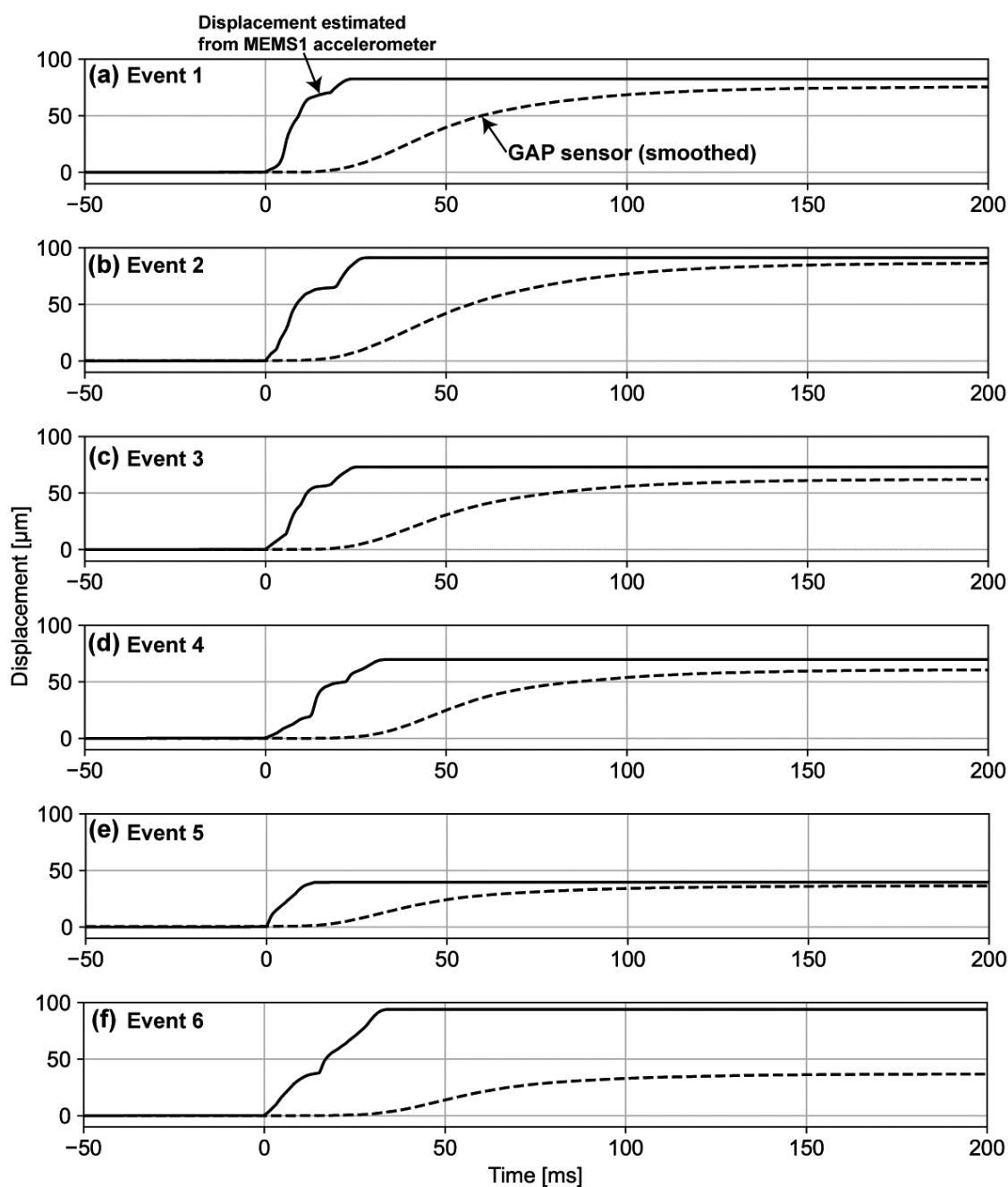


図 20 他のすべりイベントについての変位推定 (a-f)。実線が MEMS1 の加速度波形から推定された変位，破線が GAP センサを表す。図 19 と同様，GAP センサには移動平均フィルタを適用している。

Fig. 20 Comparison of displacement associated with different slip events (a-f). Solid line shows the displacement inferred from MEMS1, while dashed line shows the GAP sensor. The same as Fig. 19, the moving average filter is applied to the GAP sensor.

しも常にせん断荷重の载荷方向と同じ向きにすべりが生じるとは限らない。したがって、断層面に対して対称に上下試料それぞれに加速度センサを設置し、運動方向の仮定を置くことなくその差分からすべり面の相対変位を精度よく推定できるかを今後検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では防災科学技術研究所が所有する4 m 岩石摩擦試験機を用いた実験において、光ファイバひずみ計測システムであるFBGセンサを用いたひずみ計測、またMEMS式および圧電式加速度センサを用いた加速度計測を行い、岩石試料のひずみ変化や断層面のすべりに伴う変位の計測精度について検討した。FBGセンサは岩石試料の長期的なひずみ変化や、今後計測分解能を改善すれば、すべりイベント時のミリ秒スケールでの滑らかなひずみ変化を計測できる精度を有していることが示された。FBGセンサは少ないチャンネル数で多点の計測(例えば本研究で用いたインテロゲータでは、1チャンネルあたり最大40点)が可能であり、また光ファイバの径が小さく取り付けも容易であることから、試料側面のひずみ計測だけでなく、断層面に光ファイバを埋め込み、面内のひずみ変化を直接計測するような活用法が今後期待される。

また、MEMS1加速度センサを用いて、高周波帯での減衰特性によってオーバーロードを避け、かつすべりイベント時の変位を推定するのに十分な周波数帯(~10 kHz)の加速度を測定できた。その加速度波形に本研究で提案した一連の処理を適用することで、すべりイベント時の変位を精度良くロバストに推定できた。すべりイベント時の変位履歴は、断層面の破壊進展様式や、せん断応力変化と組み合わせることですべり依存の摩擦則についての議論に活用される。

今後は従来のひずみゲージやGAPセンサ、AEセンサに加え、本研究で検討したFBGセンサや加速度センサを用いることで、時間・空間的な補間では議論できないより詳細な断層の破壊様式を明らかにすることを目指す。

付属資料

本研究で用いたFBGセンサ、ひずみゲージ、加

速度センサ、GAPセンサの波形データは付属資料にて利用可能である。

謝辞

本実験の実施にあたり、株式会社東陽テクニカよりFBGセンサおよび加速度センサの貸し出しを受けました。ひずみ、加速度のデータ収録、またデータの解釈に関して東陽テクニカ 伊藤友喜男様、久世千絵様にご協力、ご助言をいただきました。防災科研 澤崎郁氏、太田和晃氏からは執筆にあたり有益なコメントをいただきました。ここに記し、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Latour, S., Schubnel, A., Nielsen, S., Madariaga, R., and Vinciguerra, S. (2013): Characterization of nucleation during laboratory earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **40**(19), 5064-5069, 10.1002/grl.50974.
- 2) Svetlizky, I. and Fineberg, J. (2014): Classical shear cracks drive the onset of dry frictional motion. *Nature*, **509**(7499), 205-208, 10.1038/nature13202.
- 3) Buijze, L., Guo, Y., Niemeijer, A. R., Ma, S., and Spiers, C. J. (2020): Nucleation of stick-slip instability within a large-scale experimental fault: effects of stress heterogeneities due to loading and gouge layer compaction. *J. Geophys. Res.*, **125**(8):e2019JB018429, 10.1029/2019JB018429.
- 4) Fukuyama, E., Tsuchida, K., Kawakata, H., Yamashita, F., Mizoguchi, K., and Xu, S. (2018): Spatiotemporal complexity of 2-d rupture nucleation process observed by direct monitoring during large-scale biaxial rock friction experiments. *Tectonophysics*, **733**, 182-192, 10.1016/j.tecto.2017.12.023.
- 5) Urata, Y., Yamashita, F., Fukuyama, E., Noda, H., and Mizoguchi, K. (2017): Apparent dependence of rate- and state-dependent friction parameters on loading velocity and cumulative displacement inferred from large-scale biaxial friction experiments. *Pure. Appl. Geophys.*, **174**(6), 2217-2237, 10.1007/s00024-016-1422-9.
- 6) Yamashita, F., Fukuyama, E. and Xu, S. (2019): Foreshock activities controlled by slip rate on a

- 4-meter-long laboratory fault. AGU Fall Meet. Abstr. no MR11B-0034.
- 7) Fukuyama, E., Xu, S., Yamashita, F., and Mizoguchi, K. (2016): Cohesive zone length of metagabbro at supershear rupture velocity. *J. Seismol.*, **20**(4), 1207-1215, 10.1007/s10950-016-9588-2.
- 8) Kreuzer, M. (2006): Strain measurement with fiber Bragg grating sensors. HBM, Darmstadt, S2338-1.0 e, 1-9.
- 9) 石川 真二 (2000) : 光ファイバークレーティングによる精密計測技術. 応用物理, 69 巻, 6 号, 648-654, 10.1147/oubutsu1932.69.648.
- 10) 小野紘一・大島義信・杉浦邦征 (2002) : FBG センサを用いたひずみ計測用モジュールの開発. 応用力学論文集, 5 巻, 863-872, 10.2208/journalam.5.863.
- 11) Lindsey, N. J., Dawe, T. C., and Ajo-Franklin, J. B. (2019): Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing. *Science*, **366**(6469), 1103-1107, 10.1126/science.aay5881.
- 12) Ide, S., Araki, E., and Matsumoto, H. (2021): Very broadband strain-rate measurements along a submarine fiber-optic cable off cape muroto, nankai subduction zone, japan. *Earth, Planets and Space*, **73**(1):63, 10.1186/s40623-021-01385-5.
- 13) Nishimura, T., Emoto, K., Nakahara, H., Miura, S., Yamamoto, M., Sugimura, S., Ishikawa, A., and Kimura, T. (2021): Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system. *Scientific Reports*, **11**(1):6319, 10.1038/s41598-021-85621-8.
- 14) Parker, T., Shatalin, S., and Farhadiroushan, M. (2014): Distributed acoustic sensing--a new tool for seismic applications. *First Break*, **32**(2), 10.3997/1365-2397.2013034.
- 15) Jaeger, J. C. (2012): *Elasticity, fracture and flow: with engineering and geological applications*. Springer Science & Business Media, 10.1007/978-94-011-6024-7.
- 16) Beyreuther, M., Barsch, R., Krischer, L., Megies, T., Behr, Y., and Wassermann, J. (2010): ObsPy: A Python Toolbox for Seismology. *Seismol. Res. Lett.*, **81**(3), 530-533, 10.1785/gssrl.81.3.530.
- 17) Withers, M., Aster, R., Young, C., Beiriger, J., Harris, M., Moore, S., and Trujillo, J. (1998): A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **88**(1), 95-106.

(2021年12月7日原稿受付,
2021年12月7日原稿受理)

要 旨

防災科学技術研究所が保有する 4 m 岩石摩擦試験機を用いた岩石摩擦実験において、fiber Bragg grating (FBG) センサによる岩石試料のひずみ計測、および microelectromechanical system (MEMS)、圧電式 (PZ) 加速度センサによる加速度計測を実施し、岩石試料のひずみ変化やすべりイベント時の変位を推定した。FBG センサのノイズレベルは、すべりイベント時のひずみ変化を計測する上で十分小さいことが半導体ひずみゲージとの比較から確認できた。しかし、その計測分解能がすべりイベント時の岩石のひずみ変化と同程度 ($\sim 1 \mu\epsilon$) であったため、より精度良くひずみ変化を計測するためには分解能の改善が必要であることが明らかになった。PZ センサでは共振によって入力加速度の高周波成分が増幅し、加速度の測定範囲を超えるオーバーロードが発生した一方で、MEMS 式加速度センサによる計測では PZ センサとは異なる共振特性による高周波帯の減衰のためオーバーロードを避けることができた。MEMS 一軸型加速度センサによる加速度波形を本研究で提案した一連の手順で処理することで、すべりイベント時の変位推定をロバストに行うことができた。本研究で行った解析は、今後 FBG センサや加速度センサを用いてより詳細な断層破壊様式を議論するための基盤となる。

キーワード : FBG センサ, 加速度センサ, 岩石摩擦試験, 4 m 岩石摩擦試験機, スティックスリップ