

# 緊急地震速報を利用した 走査型トンネル顕微鏡実験中の地震対策

吉澤 俊介<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>物質・材料研究機構 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

(20XX年XX月XX日受付; 20XX年XX月XX日掲載決定)

## Earthquake countermeasures in scanning tunneling microscopy experiments using earthquake early warning

Shunsuke Yoshizawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047

(Received XXX XX, 20XX; Accepted XXX XX, 20XX)

Frequent earthquakes in Japan can be problematic for vibration-sensitive measurements. For example, in scanning tunneling microscope (STM) experiments, seismic vibrations cause noises in the data and sometimes lead to a tip crash against the sample surface. The risk of tip crash rises during spectroscopic imaging measurements using STM, where the feedback control is disabled for most of the long measurement time. Here, we have developed a system to prevent tip crashes by retracting the tip in response to the earthquake early warning of the Japan Meteorological Agency. The technique utilizes a built-in function of a commercial STM controller, and an earthquake monitoring service offered by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. We present data to demonstrate how the system works at an earthquake. Our work provides hints for conducting vibration-sensitive measurements in earthquake-prone countries.

KEYWORDS: scanning tunneling microscope, spectroscopic imaging, earthquake, earthquake early warning

### 1. はじめに

環太平洋地震帯に位置する日本は、世界的に見ても地震活動が活発な地域のひとつだ<sup>1)</sup>。2021年だけでM6以上の地震は国内で18回観測されており<sup>2)</sup>、世界全体で観測されたM<sub>w</sub>6以上の地震157回<sup>3)</sup>のうち、およそ1割に相当する<sup>1)</sup>。そのうち最大震度5弱以上を観測した地震は10回であった<sup>4)</sup>。このような大きな地震を念頭に置いた対策も防災の観点から重要だが、人的・物的被害が見込まれない小さな地震はさらに高頻度で発生しており、振動に弱い実験では深刻な問題となる。

表面・真空科学分野において、走査型トンネル顕微鏡 (Scanning tunneling microscope; STM) は振動に弱い

手法の代表のひとつだろう。STMでは、金属性の探針をプローブとして試料表面から1nm程度まで近付け、探針・試料間を流れるトンネル電流を検出しながら表面を走査する。トンネル電流の大きさは探針・試料間距離に非常に敏感なので、トンネル電流を一定に保つよう探針高さをフィードバック制御することで、原子レベルの空間分解能を実現できる。その空間分解能の高さの代償が振動に対する弱さだ。地震などでSTMが揺れると、探針・試料間の距離が変動するので取得したデータも変動する。揺れ幅があまりに大きければ探針が試料にぶつかる「クラッシュ」が発生する。こういった事故を防ぐため、装置全体を空気ばね式の防振台に乗せたり、STMのヘッド部分を柔らかいばねで吊り下げるなど、何重かの振動対策が講じられる。

\*E-mail: YOSHIZAWA.Shunsuke@nims.go.jp

<sup>1)</sup> 日本の地震回数統計では気象庁マグニチュードM、アメリカ地質調査所 (United States Geological

Survey; USGS) による世界の地震回数ではモーメントマグニチュードM<sub>w</sub>が使用されている。



い。そこで緊急地震速報との連携が必要になる。

緊急地震速報 (earthquake early warning; EEW) は、地震の発生直後に気象庁から発表される情報だ<sup>5)</sup>。地震波は、縦波の P 波 (primary wave) と横波の S 波 (secondary wave) から構成され、強い揺れをもたらすのは S 波だ。地殻上層部の固い岩盤における地震波の速度は、P 波の約 6-7 km/s に比べて S 波は 3-4 km/s と遅い。震源近くの地震計で P 波を検知した段階で、地震の規模や震源を推定し、その情報をできるだけ早く周知すれば、まだ S 波の到達していない地域では強い揺れに前もって備えることができる。

緊急地震速報には、一般向けに発表される「警報」と、高度利用者向けに発表される「予報」がある。警報は、被害が想定される規模の地震に対して発表される<sup>iv)</sup>。携帯電話の緊急速報メールで通知されるのはこちらの警報だ。一方の予報は、もっと小規模の地震から発表されており<sup>v)</sup>、発表内容には地震の発生時刻、震源の推定位置、マグニチュードの推定値などが含まれる。

緊急地震速報 (予報) と SafeTip 機能を連携できれば、探針退避システムになる。通常、予報を受信するためには、気象業務支援センターまたは配信事業者と個別に契約する必要があり、費用もかかる。ところが 2011 年 4 月から東京大学地震研究所が学内限定で緊急地震速報の配信アプリを公開し<sup>6)</sup>、物性研究所ではこれを利用できた。気象庁が緊急地震速報 (予報) を発表すると、アプリ上に地震の情報が表示されると同時に「ピンポン！」とアラームが再生される。この音声信号を PC のオーディオ端子から取り出し、STM コントローラのアナログ入力に接続すれば SafeTip のトリガとして使える。

こうして緊急地震速報アプリのピンポン音にあわせて探針が退避するだけのセットアップが完了した。簡単だが効果てきめんで、余震を回避しながら分光イメージングを完了できるようになり、論文に使えるデータも取得できた<sup>7)</sup>。しかし、課題も残った。一つは、アラームを鳴らす条件を細かく指定できないため、日本全国どこで地震が起きても探針が退避してしまうこと。もう一つは、地震研のアプリが学内限定のため、所属が変わってからは利用できなくなったことだ。

<sup>iv)</sup> 「警報」は、地震波が 2 点以上の地震観測点で観測され、最大震度が 5 弱以上と予想された場合に発表される。

<sup>v)</sup> 「予報」は、いずれかの地震観測点において P 波または S 波の振幅が 100 ガル以上となった場合、または、地震計で観測された地震波を解析した結果、震

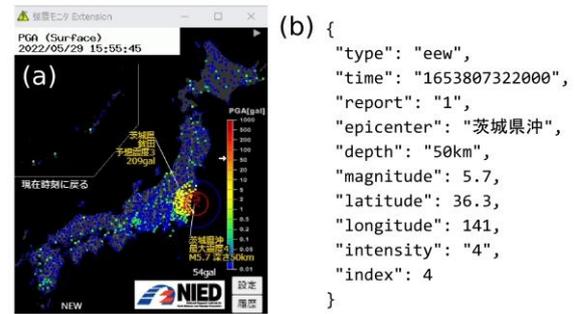


Fig.2. (color online) Kyoshin Monitor Extension.<sup>9)</sup> (a) The main window of the software. (b) The information of EEW posted from the software to the specified HTTP server.

### 3. 震度推定の方法と改良版探針退避システム

物質・材料研究機構に異動して再び STM 実験を本格的に実施するようになり、緊急地震速報と連携する必要性が生じた。先に挙げた課題を解決するため、緊急地震速報の取得方法と、探針退避の動作を実験室所在地における震度に応じて変える方法を検討した。

緊急地震速報の取得には、NIED が提供する「強震モニタ」<sup>8)</sup>を利用した。これは強震観測網 (K-NET, KiK-net) とよばれる日本全国の地震計ネットワークで観測した揺れをリアルタイム表示するサービスだが、気象庁が発表する緊急地震速報もあわせて画面に表示される。しかし画像では無く数値として情報を取得するには工夫が必要で、ここでは Chrome ウェブブラウザの拡張機能「強震モニタ Extension」<sup>9)</sup>を利用した。Fig. 2(a)に動作画面を示す。この拡張機能は、NIED の強震モニタのデータを取得して、付加機能を提供しつつ表示するもので、個人が開発されている。地震のデータを指定された HTTP サーバーに送る機能があり、地震の情報を数値として簡単に取得できる<sup>10)</sup>。

源・マグニチュード・各地の予測震度が求まり、マグニチュードが 3.5 以上もしくは最大予測震度が 3 以上の場合に発表される。迅速性を優先した第 1 報につづき、情報の精度を高めながら第 2 報、第 3 報と数回にわたって発表され、精度が安定した時点で最終報が発表される。

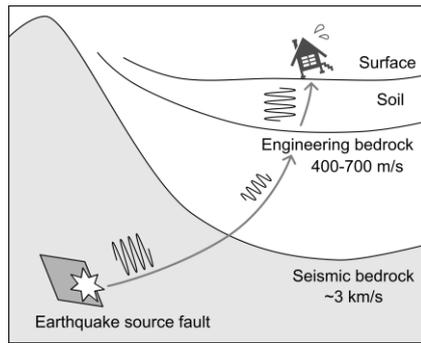


Fig.3. Schematic illustration showing the propagation of seismic waves.

緊急地震速報（予報）から取得した情報をもとに実験室での震度を推定すれば、その値に応じて探針退避の必要性を判断できる。震度の推定には経験式に基づく方法<sup>11)</sup>（簡便法とも呼ばれる）が使える。以下では、計算式と背景にある考え方を説明する。

われわれが暮らす地殻上層部は、岩盤の上に表層地盤として堆積層が乗っている（Fig. 3）。堆積層は浅くなるほど柔らかく、地震波が遅く伝わり、地震動を増幅するはたらきがある。そのため、震源からの距離が同程度であっても、表層地盤の特性が異なれば震度も変わる。これに対し、深部の固い地盤では、地震波の伝わり方は表層地盤の影響を受けず、震源からの距離だけでほぼ決まるとみなせる。そこで S 波速度が 400-700 m/s のある程度固い地層を「工学的基盤」と呼び、①地震波が震源からの距離に応じて減衰する効果と、②表層の柔らかい地盤によって増幅される効果とを切り分けて計算する基準に用いられている。工学的基盤は地表から数十 m の深さに位置する。

まず、①地震波が震源からの距離に応じて減衰する効果については、以下の経験式<sup>12)</sup>がある。

$$\log_{10} V_b = 0.58M_w + 0.0038D - 1.29 - \log_{10}(X + 0.0028 \times 10^{0.50M_w}) - 0.002X \quad (1)$$

ここで、 $V_b$ は工学的基盤上面の最大速度（cm/s）、 $M_w$ はモーメントマグニチュード、 $D$ は震源深さ（km）、 $X$ は断層最短距離（km）である。今回は $M_w$ は気象庁マグニチュードと同一視する。また、地震は有限の大きさの断層で発生するので本来 $X$ は断層の大きさを加味して

<sup>vi</sup> このような方法で予想した震度を反復・継続して他者に提供すると「予報業務」とみなされ気象業務法の制約を受ける可能性がある。予報業務許可を申請しないのであれば個人での利用にとどめよう。

<sup>vii</sup> Python で記述しており、標準ライブラリから

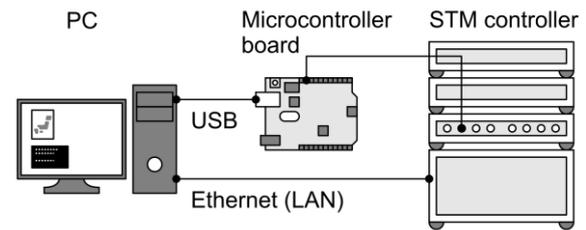


Fig.4. Configuration of the revised tip retraction system.

決める必要があるが、簡単のため断層の大きさは無視し、震央距離（地表に沿って測った距離）と震源深さの自乗和の平方根で近似している。つぎに、②表層の柔らかい地盤によって地震動が増幅される効果については、以下の経験式<sup>13)</sup>が利用できる。

$$\log_{10} A_{600} = 2.367 - 0.852 \log_{10} V_{30} \pm 0.166 \quad (2)$$

ここで、 $A_{600}$ は、（平均 S 波速度 600 m/s の）工学的基盤を基準とした最大速度増幅率、 $V_{30}$ は表層 30 m の平均 S 波速度である。 $V_{30}$ の各地での値は、NIED が運用する地震ハザードステーション J-SHIS にアクセスすると 250 m メッシュで取得できる<sup>14)</sup>。たとえば物質・材料研究機構千現地区の界面制御実験棟付近における $V_{30}$ の値は 226 m/s だ。式(1)と(2)の結果を使って、地表の最大速度 $V_s$ は、

$$V_s = A_{600} V_b \quad (3)$$

で与えられる。最後に、地表の最大速度 $V_s$ と計測震度 $I$ のあいだの関係式<sup>15)</sup>

$$I = \begin{cases} 2.002 + 2.603 \log_{10} V_s - 0.213(\log_{10} V_s)^2 & (I \geq 4) \\ 2.165 + 2.262 \log_{10} V_s & (I < 4) \end{cases} \quad (4)$$

を使って地表の震度が推定できる<sup>vi</sup>。

今回作った改良版探針退避システムの構成を Fig. 4 に示す。強震モニタ Extension および、緊急地震速報の情報を処理するプログラム<sup>vii</sup>（以降、EEW 処理プログラムと呼ぶ）は、STM 制御用の PC で実行している。EEW 処理プログラムはまず HTTP サーバーとして動作し、強震モニタ Extension から緊急地震速報の情報が送られるのを待ち受ける。この情報は Fig. 2(b) のよ

datetime、http、json、外部ライブラリとして NumPy、GeoPy（経度緯度から震央距離を求めるため使用）、pySerial（Arduino との RS-232 通信に使用）を利用している。

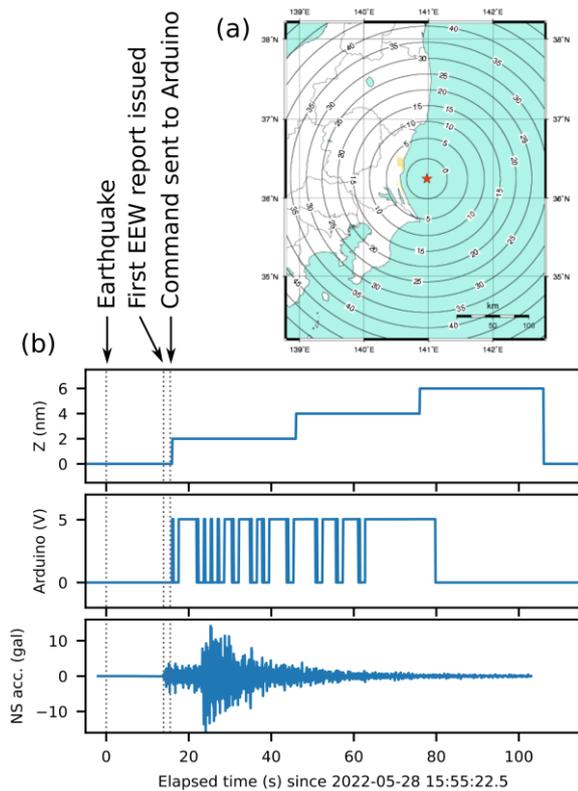


Fig.5. (color online) Records of the tip retraction system at earthquake occurred on May 28th, 2022. (a) Estimated time from the first report of EEW to the arrival of the S wave. The image was adapted from the website of the Japan Meteorological Agency.<sup>16)</sup> (b) The z-position of the STM tip, output of the microcomputer board, and the seismic waveform (acceleration in the north-south direction recorded at NIED in Tsukuba).

うな JSON フォーマットで与えられ、発生時刻、マグニチュード、震央の経度・緯度、震源深さが含まれる。これらの値から簡便法により震度を推定し、1 を超えた場合に探針退避処理に進む。装置の揺れが収まるまでの時間を適当に見積もり、その時間までマイコンボード (Arduino UNO R3) のデジタル出力ピンを HIGH にする。この出力は STM コントローラのアナログ入力ピンに接続され、SafeTip 機能で監視する。

Fig. 5 は、実際の地震における探針退避システムの動作記録だ。この地震は 2022 年 5 月 29 日 15 時 15 分 22.5 秒に茨城県沖で発生し、最終的に確定された規模

<sup>viii</sup> Arduino UNO R3 ではシリアル通信を開始するたびボードがリセットされる。Fig. 5(b) の Arduino の出力が楕形の波形になっているのは、緊急地震速報の第 2 報以降を受け取るたびにシリアル通信をくりかえ

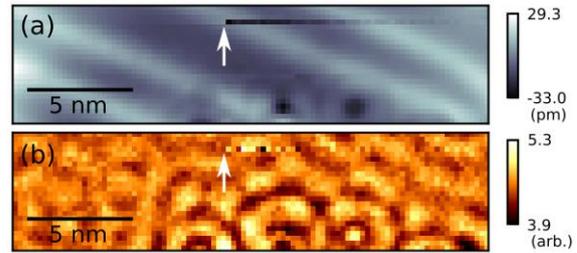


Fig.6. (color online) Spectroscopic imaging data of the Au(111) surface recorded at 4.5 K. (a) Topographic image of a 22.5 nm × 5.6 nm region. The scan direction was from left to right (fast scan) and from bottom to top (slow scan). The setpoint condition was 50 pA at 0.7 V. The earthquake occurs at the pixel indicated by the arrow. (b) Differential conductance image at 0 V recorded simultaneously with (a).

は M 5.3 で、鹿嶋市などで最大震度 4 が観測された。実験室のあるつくば市での震度は 3 だった。Fig. 5(a)には、緊急地震速報 (予報) の第 1 報が発表されてから S 波が到達するまでの猶予時間が震央を中心とする同心円で示されている。その第 1 報は 15 時 15 分 36.4 秒に発表され、これを検知した強震モニタ Extension が EEW 処理プログラムに情報を送信したのは 15 時 15 分 37 秒だった。EEW 処理プログラムは実験室での予想震度を 3.4 と計算し、探針退避のためのコマンドをマイコンボードに送った。この通信は 15 時 15 分 39 秒に完了した。Fig. 5(b) のグラフではマイコンボードの出力が HIGH になると同時に探針が 2 nm 上がっており、SafeTip 機能が発動したことがわかる。プロットしている地震波形は NIED の観測点 (つくば市天王台) のもので、探針退避と前後して P 波が到達し、さらに 7-8 秒後に S 波が到達していることから、この地震は安全に回避できたと言える。探針の高さが階段状に変化しているのは、SafeTip 機能の解除判定が 30 秒ごとに行われ、解除されないと追加で 2 nm 離してしまう仕様を反映している。マイコンボードの出力が細かく HIGH/LOW を繰り返しているのはバグで、現在は解消している<sup>viii</sup>。

探針退避システムが作動したときの測定データへの影響を Fig. 6 に示す。これは、2022 年 5 月 20 日 23 時 15 分から 22 日 12 時 56 分にかけて測定した Au(111)

したのが原因だった。この自動リセットの挙動はボードの GND と RESET ピンの間に 10 μF のコンデンサを取付けることで無効にできる。

表面の分光イメージングデータで、地震が起きた箇所がわかりやすいよう一部を切り出して示している。地震は 22 日 12 時 24 分 11 秒に茨城県沖で発生し、規模は M 6.0、茨城県つくば市での震度は 2 だった。Fig. 6(a) は分光データと同時に取得したトポグラフィ像で、この表面特有のヘリングボーン構造が斜めのストライプ状に見えている。Fig. 6(b) はバイアス電圧 0 V における微分伝導度の像で、電子定在波による空間変調が確認できる。地震は矢印の位置で発生し、探針退避システムによって探針が試料表面から離れた。しばらくして探針が再び近付き測定が再開されたが、探針を動かすピエゾスキャナのクリープ現象が z 座標の緩和としてトポグラフィ像に映り込んでいる（矢印から右側に伸びる線）。一方の分光像では同じ位置に STM 装置の揺れが減衰しきっていなかったことに起因するノイズが確認できるが、10-20 ピクセルほど進めば見えなくなっている。その後のデータが地震が起こる前の部分と連続的につながっていることから、探針の状態は地震の影響を受けなかったことがわかる。

今回作った探針退避システムは、震央が実験室から離れているときは非常に有効にはたらくが、直下型地震はやや苦手だ。その理由は緊急地震速報が発表される前に S 波が到達してしまう場合があるからだ。実はつくば市のある茨城県南部から千葉県北西部にかけての地下 50-70 km には「地震の巣」があり、定常的に地震活動が盛んなことが知られている<sup>16)</sup>。ここで起きる地震は、探針退避システムの苦手な部類で、このような直下型地震にも対処するには別の対策が必要になるかもしれない。それは今後の課題だ。

#### 4. まとめ

本稿では STM による長時間測定中の地震対策として、緊急地震速報と組み合わせるアイデアを提案した。緊急地震速報（予報）に含まれる情報をもとに、実験室での震度を予想し、その値に応じて探針を一時的に試料から離すシステムの実装例を、動作事例とともに紹介した。地震国特有の問題を地震国特有の発達した観測網で対抗した例として STM ユーザー以外の研究者にも参考になれば幸いに思う。

#### 謝辞

物質・材料研究機構で極低温 STM 装置を使わせていただいた鷺坂恵介博士、物性研究所時代に指導して

いただいた小森文夫教授に感謝いたします。本研究では防災科学技術研究所が運用する強震観測網からのデータおよび強震モニタを利用しています。強震モニタ Extension の作者様にも感謝申し上げます。本研究の一部は、JSPS 科研費 21H01817, 21K18898 の助成を受けました。

#### 文 献

- 1) 宇津徳治, "地震学 第 3 版" (共立出版, 2001).
- 2) 震度データベース検索, 気象庁, <https://www.data.jma.go.jp/eqdb/data/shindo/> (Accessed: 2021-09-08)
- 3) Latest Earthquakes, USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/> (Accessed: 2021-09-08)
- 4) 令和 3 年 12 月 地震・火山月報 (防災編), 気象庁, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/gaikyo/> (Accessed: 2021-09-08)
- 5) 緊急地震速報について, 気象庁, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/nc/> (Accessed: 2021-09-08)
- 6) 学内ネットワークによる緊急地震速報の提供開始について, 東京大学地震研究所, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/EEW/eew20110420.html> (Accessed: 2021-09-08)
- 7) S. Yoshizawa, F. Nakamura, A. A. Taskin, T. Iimori, K. Nakatsuji, I. Matsuda, Y. Ando, and F. Komori, Phys. Rev. B 91, 045423 (2015).
- 8) 強震観測網 (K-NET, KiK-net), 防災科学技術研究所, <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (Accessed: 2021-09-08)
- 9) 強震モニタ Extension (Chrome, Android 対応), <http://kyomonix.web.fc2.com/> (Accessed: 2021-09-08)
- 10) @Takagi, 緊急地震速報を強震モニタで受け取り JSON で扱うとめっちゃ速い, Qiita, <https://qiita.com/Takagi/items/fc88b692ca6fadd16cb2> (Accessed: 2021-09-08)
- 11) 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」) (令和 2 年 3 月 6 日), 地震調査研究推進本部, [https://www.jishin.go.jp/evaluation/strong\\_motion/strong\\_motion\\_recipe/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/strong_motion/strong_motion_recipe/) (Accessed: 2021-09-08)
- 12) 司宏俊, 翠川三郎: 日本建築学会構造系論文集, 523, 63 (1999).
- 13) 藤本一雄, 翠川三郎: 日本地震工学会論文集 6, 11 (2006).
- 14) J-SHIS Map, 防災科学技術研究所, <https://www.jshis.bosai.go.jp/map/> (Accessed: 2021-09-08)
- 15) 藤本一雄, 翠川三郎: 地域安全学会論文集 7, 241 (2005).
- 16) 緊急地震速報 (予報) 発表状況, 気象庁, [https://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/nc/fc\\_hist/2022/05/20220529155531/](https://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/nc/fc_hist/2022/05/20220529155531/) (Accessed: 2021-09-08)