

コンパクトフラッシュの脆弱性によるオフライン 地震観測データの消失事例

田中伸一^{*†}・西本太郎^{*}

A lost data of off-line seismic observation by the vulnerability of CompactFlash card

Shinichi S. TANAKA^{*†} and Taro NISHIMOTO^{*}

1. はじめに

2013 年に実施された立川断層帯自然地震オフライン臨時観測では、クローバテック社製レコーダー DAT5A が計 30 台使用されたが、そのうち観測点 TC30 に設置された DAT5A から回収した CompactFlash カード (CF カード) が読み取り不良であり約 2 ヶ月間の観測データが消失した。オフライン観測は観測データの正常な取得および読み出しが必要不可欠であるため、この事案の原因がどの部分にあるのかを特定することとした。本報告書では、一連の調査や実験結果について記述し、今後のオフライン観測にてデータ欠損・消失の可能性を低くするための簡便な対策を提案する。

2. 立川断層帯自然地震オフライン臨時観測の 目的と期間

文部科学省では、平成 24 年度から、「立川断層帯の重点的な調査観測」(受託先:東京大学地震研究所, 研究代表者:佐藤比呂志教授)を実施している(文科省・地震研, 2013)。このプロジェクトは 3 つのサブテーマで成り立っており、サブテーマ (1) では立川断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造解明のための調査観測を行うことを目標としている。その一環として立川断層帯において臨時地震観測を行い、首都圏自然地震観測網 (MeSO-net) の観測データ (平田ほか, 2009) と併せて、地震活動度や発震機構などを明らかにするとともに、広域的な三次元構造

を明らかにすることを目的としている。立川断層帯付近で発生する地震は震源が浅く規模も小さいと考えられるため、密な観測点間隔での観測が必要である。そのため、約 2~3 km の間隔でオフラインの地震計を 30 台立川断層帯周辺に設置した。地震計は乾電池で動くため、約 2 ヶ月毎に電池の交換とデータの回収を行なった。オフライン臨時地震観測の期間は平成 25 年 1 月 21 日から 3 月 6 日までを第一期、3 月 7 日から 5 月 15 日までを第二期、5 月 16 日から 7 月 26 日を第三期とする。読み取り不良が発生した CF カードは観測点 TC30 の第二期で回収されたものである。

3. TC30 において用いられた観測機材

オフライン観測点 TC30 では以下の機材が用いられた。

レコーダー:クローバテック社製 DAT5A

※乾電池使用時の定格電圧 9V

センサー:レナーツ社製 LE-3Dlite MkII (S/N: I742)

※固有周期 1Hz, 電圧感度 400V/m/s, 定格電圧 12V, 電流 8mA

電池:パナソニック社製 EVOLTA 単 1 乾電池 48 個

CF カード:ADATA 社製 Speedy 16GB

DAT5A には DC-DC コンバーター (昇圧回路) が組み込まれており、長期使用により電池の電圧が下がっても昇圧をかけ続けるため、電池が消耗して昇圧できる下限値を超えた瞬間に DAT5A が動作を停止する仕様になっている。また、この CF カードのラベルに記入された日付から、過去の観測に 2 回 (およそ 4 ヶ月間) 用いられていたことがわかっている。

TC30 は民家の駐車場に設置されており、保守が実施さ

2013 年 8 月 20 日受付, 2013 年 12 月 24 日受理.

[†] sst@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所技術部総合観測室.

^{*} Technical Supporting Section for Observation Research, Technical Division, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.



図 1. 平成 25 年 7 月 1 日に実施した TC30 の点検および保守 外装や DAT5A に異常は見られなかった。

れた際に DAT5A の外観に問題は見られなかった (図 1)。

4. CF カード読み取り不良の発生と原因調査

立川断層帯自然地震観測第二期のデータを回収して第三期の観測を開始させるため、5月15日に観測点 TC30 の保守作業が実施されたが、DAT5A に操作端末 (HP 製ポケットコンピューター) を接続しても通信できず、電池の電圧をテスターで計測すると約 7.3 V まで低下している状態であった。CF カード及び電池を交換すると観測が正常に開始された。その時に回収された CF カードは Windows PC 及び Linux PC でマウントできず読み取り不能であった。その後、クローバテック社に CF カードの調査を依頼したが、同様に CF カードを PC にマウントできないことが確認された。また、定格電圧 (5V) を CF カードに印加したところ、約 42.2 mA の電流が流れており、正常品の約 1.0mA に比べて 40 倍の電流が流れていたため、CF カードに不具合が生じている可能性が高かった。この時点における状況をまとめると、①もし DAT5A の動作不良 (たとえば主電源の電圧がそのまま CF カードに加わった) によって CF カードが壊れた場合は、DAT5A 本体にも何らかのダメージが残る可能性が高いと考えられる。5月15日の電池/CF カード交換の際に通常動作を確認できたのであるから DAT5A の不具合ではないと考えられる。②回収後の CF カードに定格の 40 倍の電流が流れ続けていたとすると、5月15日の回収時の電池電圧はもっと低下しているはずであるが、その電圧は 7.3V であり通常の観測で見られる電圧降下と同程度であった。そのため、CF カードは観測期間 (約 2 ヶ月間) の後半に壊れた可能性がある。従って、CF カードの中に観測データの一部が残っている可能性があるため、データサルベージ会社である「エムディーエスデータリカバリーセンター」にデータの吸い出しを依頼した。しかし、CF カードを分解

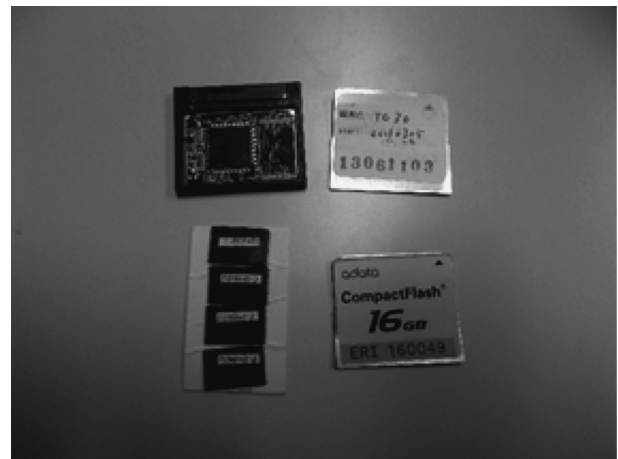


図 2. 分解検査後に返却された CF カード。

してメモリ IC チップ (図 2) を取り出し直接アクセスしてみるとという手法をとっても、まったく読み取れない状態であったと報告があり、TC30 (第二期) のデータ消失がほぼ確定した。

以上を総合すると、今回の不具合の原因は CF カードの不良である可能性が最も高いが、TC30 の DAT5A が不具合を起こしている可能性を否定できない。また、第二期観測では TC17 にもデータの一部欠損が認められていて、過去に同種のレコーダーを用いた観測に比べて不具合が多かった。

TC30 は立川断層帯観測の西南端に位置しているため最も重要な観測点の一つに挙げられる。同観測点の DAT5A は CF カード・電池を交換した際に問題が認められなかったため第三期も引き続き使用されており、これ以上のデータ消失を防ぐために 7 月 1 日に TC30 の点検・保守を行なうことになった。その結果、DAT5A は観測を続けており、CF カードには観測データが正常に記録されていた。また、

電池の電圧は7.95 Vであった。電子機器の稼働が正常かどうかの判断材料の一つとして消費電力が挙げられ、それは電池の電圧降下速度とほぼ同義である。新品の電池（パナソニック社製 EVOLTA 単1乾電池）から供給される電圧は約9.7 Vであり、5月15日から数えて47日目に7.95Vであったため、電圧降下速度は0.036 V/dayである。第二期のTC30は3月5日から観測を開始し5月15日の時点で7.3 Vであったため、同日まで電池を消費していたと仮定すると電圧降下速度は0.034V/dayである。ここで、過去にDAT5AとLE-3Dliteを用いた臨時地震観測の結果より、それらの電圧降下速度は概ね0.029～0.036 Vの範囲であり、TC30にて計測された電圧降下速度はおおよそ正常であるといえる。第一期および第三期のデータが正しく取得されていた事実を併せると、DAT5Aに異常はなくCFカードに不良があったと考えるのが妥当である。

5. CFカードの概要

CFカードそのものに不良があると考えられるため、この章では、CFカードの概要を記述する（参考文献、横山・杉山（2007）、松川（2011））。

5.1 CFカードの規格

CFカードはSandisk社が開発した小型メモリ・カードの第一号であり、1995年の量産以降、世界中のデジタルカメラ、MP3プレーヤーから産業用ハンディ・ターミナル、通信用基地局など幅広く使用されている。CFカードはPCカードATAの規格を踏襲している。PCカードATAは、ANSI AT Attachment Interface for Disk Drives (x.3.2.11-1994)のプロトコルをインターフェースに採用し、大容量記憶装置をPCカードにしたものである。言い換えるとハードディスクの記憶装置やプロトコルをPCカードの中に実現したものである。クローバテック社DATシリーズは改良の過程でハードディスクが採用されており（羽田、2006）、ハードディスクからCFカードへの記憶媒体の変更は容易であったと考えられる。

5.2 CFカードの特徴

CFカードの内部はコントローラーとフラッシュメモリから構成される。従ってホストシステムから直接フラッシュメモリにアクセスすることはなく、その制御はコントローラーが行なう。CFカードのインターフェースはPCカードATAに加えてTrue IDEをサポートしている。ユーザーのホストシステムからはリードセクタコマンド、ライトセクタコマンドなどのATAコマンドでカードにアクセスする。CFカードの内蔵コントローラーは、これをフラッシュメモリの読み出し、消去、書き込み、検証の各制御シーケンスに変換しフラッシュメモリを制御している。従って、ホストシステムは、複雑なフラッシュメモリのアクセス制御を意識する必要はない。また、コントローラーには不具

合ビットの修正のため、ECC（Error Correction Code）による不具合ビットの検出および修正を自動的に行なう機能も含まれている。

5.3 CFカードに採用されているフラッシュメモリの仕様

CFカードやSDカード、USBメモリにはNAND型フラッシュメモリが採用されている。NAND型フラッシュメモリの1個のメモリセルは、2層ゲートの金属酸化膜半導体トランジスタ1個で形成される。絶縁膜に囲まれた1層目の浮遊ゲートにトンネル酸化膜（一般的にはSiO₂（平野ら2007））を通して電子を出し入れすることによって、そのトランジスタの閾値電圧を変化させる。浮遊ゲートに電子を注入する動作を書込みと呼び、その結果セルの電圧は高くなる。一方、電子を放出する動作を消去と呼び、その結果セルの電圧は低くなる。しかし、トンネル酸化膜は完全な絶縁体ではなく、また書き換えを繰り返すとトンネル酸化膜が劣化するため、電子が漏れる欠陥や電荷を捕獲する欠陥が発生し、セルの電圧を変化させデータの消失に繋がる。従って、①トンネル酸化膜は完全な絶縁体でないためNAND型フラッシュメモリに記録されたデータはいずれ消失する、②書き換えを繰り返すとトンネル酸化膜が劣化しセル内の電圧を維持できなくなってデータ消失の可能性が高まる。これらの原因によってデータが消失した場合、そのリカバリーは不可能である。

NAND型フラッシュメモリは、主に上記②の理由により使用を重ねるうちに不良が発生する。CFカードではその対策として、セルへのデータ書込みが規定時間を越えた場合、そのセルが含まれるブロックを不良ブロックとし、その不良ブロックは以降読み書きができないように管理対象から除外する機能を持つ。また、不良と判断されたブロックの中に正常なデータが残っていた場合は、他の正常なブロックへそのデータを移動させる。

6. 観測に用いられたCFカードの客観的な検査

NAND型フラッシュメモリの寿命は機械的な劣化の度合いによって決まることは既に述べた。この劣化は各製品に採用されている部品の質によって左右され、また同じ製品であっても多少の固体差が生じると考えられる。そこで、立川断層帯自然地震観測で用いられたCFカードの健康状態を客観的に検査するため、Windows PC対応のソフトウェアである株式会社スーホ社製HDD SCAN V2.0を用いた。HDD SCAN V2.0は様々なメディアのセクタやセルの読み込み時間をms（ミリ秒）オーダーで計測できるため、記録されたデータを改変することなくメディアの健康状態を検査できる。このソフトウェアの検査結果は、複数のセクタの検査結果を1ブロックとして表示しており、

表 1. HDD SCAN V2.0 を用いた CF カードの検査結果.

観測点名	第一期	ロット	第二期	ロット	第三期	ロット
TC01	○	α	Δ^-	β	○	γ
TC02	○	α	Δ^-	β	○	γ
TC03	○	α	○	α	○	δ
TC04	○	α	○	α	○	γ
TC05	X	β	Δ^+	β	○	γ
TC06	○	α	○	α	○	γ
TC07	○	α	Δ^-	β	Δ^+	γ
TC08	○	α	○	α	○	γ
TC09	○	α	○	α	○	γ
TC10	○	α	○	α	○	γ
TC11	○	α	○	α	○	γ
TC12	○	α	○	α	○	γ
TC13	○	α	○	α	○	γ
TC14	○	α	Δ^+	α	○	γ
TC15	○	α	○	β	○	δ
TC16	○	α	X	β	○	γ
TC17	○	α	Δ^+	β	Δ^+	γ
TC18	○	α	Δ^+	β	○	γ
TC19	○	α	Δ^+	β	○	γ
TC20	X	β	Δ^+	β	○	γ
TC21	○	α	Δ^-	β	○	γ
TC22	X	β	Δ^-	β	○	γ
TC23	○	α	X	β	○	γ

※○：各ブロックが正常で再利用可能， Δ^+ ：読み込み速度の遅いブロックが10個以下でありデータ欠損の可能性がある， Δ^- ：読み込み速度の遅いブロックが10個以上ありデータ欠損の可能性が高い，×：物理的に壊れているブロックが多数あり再利用不可

※※ ロット番号

α ：G16GNMC910445 β ：G16GMPR980119

γ ：13020480-016G-G δ ：13010574-016G-G.

検査するメディアの容量によってそのブロックの容量が異なる。立川断層帯自然地震観測にて用いられた CF カードの容量は全て 16GB であり，1 ブロックの容量は約 1.44MB である (図 3 (a))。

HDD SCAN V2.0 を用いて立川断層帯自然地震観測第一期から第三期までに使用された CF カードを全て検査した。第一期で使用された CF カードの製品名は ADATA 社製 Speedy 16GB (第二期で使用されたものと同じ製品) であり，過去に一度だけ DAT シリーズの観測 (約 2 ヶ月間) に用いられた。第二期では過去に二度の使用履歴 (約 4 ヶ月) があったため，使用期間による比較が可能である。

第三期で使用された CF カードは Silicon Power 製 200X 16GB であるため，第一期，第二期と直接の比較はできないが，新品を用いていたため観測の使用期間で比較することとする。

健康状態の判定は，状態の良いブロックの読み込み速度 (2～3ms) を基準として独自に 3 段階に分類した。○：各ブロックが正常で再利用可能， Δ^+ ：読み込み速度の遅いブロックが 10 個以下でありデータ欠損の可能性が高い， Δ^- ：読み込み速度の遅いブロックが 10 個以上ありデータ欠損の可能性が高い，×：物理的に壊れているブロックが多数あり再利用不可，である。HDD SCAN V2.0 によ

る検査結果を表1に示す。第二期に使用されたCFカード30枚のうち、○が10個、△と×が20個でありデータ欠損・消失しやすい状態であったこと、同じ製品であっても劣化速度に個体差があることが確認された。また、TC17では読み取りの遅いブロックが比較的少なくても観測データの欠損が認められており、トンネル酸化膜の劣化によるデータ消失は「完全によみこめない不良ブロック」だけで起こるとは限らない。第一期では30枚のうち4枚が×であり、使用履歴2回目においても物理的な故障が見られた。第三期では△が3点でありCFカードは比較的健康状態の良い状態であったため、観測に用いられた期間が長いほど故障する確率が高まるように見える。また、第一期から第三期において観測点毎のCFカードの状態に関連性が見られないため、DAT5Aに表立った不具合は認められない。

HDD SCAN V2.0の検査結果はブロック毎の読み取り速度を表示させるものであるが(図3(a))、第一期および第二期において△や×のCFカードは不良ブロックの場所が画面下部に集中しており(図3(b), (c))、同じ型番の製品を使用しているにもかかわらず、検査結果には大きな偏りがあった。そこで、第一期および第二期に使用したCFカードに印字されているロット番号を調べたところ二種類の番号が存在し、CFカードを分解して中身を確認したところ、コントロールICチップは同じであるが、異なるメモリICチップが使用されていた。

ADATA 社製 Speedy 16GB

ロット番号：G16GNMC910445 (表1では α と記載)

コントロールICチップ：Silicon Motion 製 SM2232T AC

メモリICチップ：SAMSUNG 製 K9HCG08U1M PCB0

ロット番号：G16GMPR980119 (表1では β と記載)

コントロールICチップ：Silicon Motion 製 SM2232T AC

メモリICチップ：micron 製 29F32G08CBAAA

そこで、HDD SCAN V2.0の検査結果とロット番号を比較したところ(表1)、第一期および第二期の△及び×のCFカードの大部分がロット番号[G16GMPR980119(表1では β と記載)]に集中していた。従って、micron製のメモリICチップに問題がある可能性が高い。また、これらのCFカードは過去の観測に使用されていたが、その時に目立った不具合は報告されていないので、使用回数が増えるほどデータ消失の可能性が高くなることを見出した。

以上をまとめると、①メモリICチップがある程度劣化してもCFカードの不良ブロック処理機能によりデータ書き込みは可能であるが、その機能により通常の使用ではその



図3. HDD SCAN V2.0の検査結果 (a) TC09 (○), (b) TC22 (△) (c) TC28 (×)。

劣化が露見し難い、②たとえ観測時に正常にデータが書き込まれていても、その後メモリICチップの劣化が進行すればデータは消失する、③メモリICチップの劣化が進行するとPCにマウントすることが出来なくなり使用不能となる、④同じ型番のCFカードでもロットによって組み込まれたICチップが異なり、品質が大きく異なることがある。

7. CFカードを使用する際の事前検査の提案

一連の調査により、NAND型フラッシュメモリの一種であるCFカードには、その構造上、データを永久に保存することは不可能であり、使用を続けるとトンネル酸化膜の劣化によって物理的に壊れる仕様であることを確認した。また、立川断層帯自然地震観測で使用されたCFカードをHDD SCAN V2.0を用いて検査し、その一部が劣化・壊れていたことを客観的に確かめた。さらに、同じ型番のCFカードであっても、ロット番号によって使用されている部品が異なり、その性能に差異があることも確認した。ここで、DATシリーズは観測開始前にCFカードのインシャライズを行なうが、メモリICチップのセルの一部に不具合が存在してもCFカードに内蔵されているコントロールICチップの機能によりその部分の書込みをスキップするためエラーを検出できない点に注意が必要である。

HDD SCAN V2.0を用いた検査方法は、一般的なWindows PCとカードリーダーさえあればフラッシュメモリを検査でき、その検査時間は正常な16GのCFカードなら約10分であるため簡便な検査方法であるといえる。従って、今後オフライン観測にNAND型フラッシュメモリ（CFカード、SDカード、USBメモリ）を使用する際には、中古のみならず新品であっても事前にHDD SCAN V2.0で検査を行ない製品の健康状態を確かめることを提

案する。また、大規模観測等で大量にNAND型フラッシュメモリを使用する際は、ロット毎に分別し、その一部を抜き取って検査することも有効な方法であると考えられる。

謝辞：本稿を執筆するにあたり、東京大学地震研究所の酒井慎一准教授と蔵下英司助教に観測や実験についてご助力を頂きました。また、同研究所の岩崎貴哉教授と篠原雅尚教授、技術部総合観測室の皆様には多くのアドバイスを頂きました。クローバテック社技術部の小川篤志さんにはDAT5Aについての技術的なレクチャーを頂きました。ここに御礼申し上げます。

文 献

- 平田 直・酒井慎一・佐藤比呂志・佐竹健治・綾瀬一起, 2009, 「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調査, 震源断層モデル等の構築等」の概要, 地震研究所彙報, **84**, 41-56.
- 羽田敏夫, 2006, DAT型コレクタの改良と新型DAT-5型レコーダの開発, 震研技報, **12**, 24-40.
- 平野 泉, 山口 豪, 関根克行, 2007, 次世代高誘電率ゲート絶縁膜HfSiONのしきい値劣化機構と寿命予測技術, 東芝レビュー, **62**, 43-47.
- 松川尚弘, 2011, NANDフラッシュメモリの書き換え条件とデータ保持寿命, 東芝レビュー, **66**, 24-27.
- 文部科学省・地震研究所, 2013, 立川断層帯における重点的な調査報告書 平成24年度 成果報告書.
- 横山智弘・杉山栄人, 2007, PCカード/CFカードの徹底研究, CQ出版, 62-71.