

XY 磁気センサーを用いた傾斜計の改良について (序報)

竹田豊太郎*・渡辺秀文*・小山悦郎**・平田安廣***・渡辺 茂****・大西正臣*****

Development of a Tiltmeter with a XY Magnetic Detector (Part 1)

Toyotaro TAKEDA*, Hidefumi WATANABE*, Etsuro KOYAMA**, Yasuhiro HIRATA***,
Shigeru WATANABE**** and Masaomi ONISHI*****

Abstract

We have developed a simple borehole-type tiltmeter. The first generation (CA-3672) was completed in September 1998. Its sensitivity was low and its specification was not enough for precise observation of the ground motion, and we are improving it since February 2000. During the process, we carried out several observations to check their specifications and to compare with a water-tube tiltmeter that was already put to practical use in many observations. As a result, we have recently completed the new model CA-3917(fourth-generation). The measurement sensitivity of this tiltmeter using a XY magnetic detector is higher than 10^{-8} radian, and zero point drift is less than 10^{-8} radian/day. These values are enough to meet the practical requirement for measuring the crust deformation accompanied with volcanic activity. In this paper, we report the outline of the developing process of the tiltmeters.

Key words : Tiltmeter, XY Magnetic Detector, High Sensitivity, Magnetometer, Borehole

はじめに

岩手火山は 1998 年の年初から活動的となり、山体周辺の地殻変動と火山活動との関連を把握するため、傾斜計の設置が急務となった。この時、ここで紹介する最初のタイプ (CA-3672) の傾斜計を利用した。その時点では一刻も早く観測を開始することが優先され、この傾斜計そのものの性能に関する吟味は曖昧となってしまった。その後、2000 年 2 月より、油壺地殻変動観測所の安定した測定環境下で水管傾斜計等との比較観測を実施しつつ、この傾斜計の性能の検証と改良を繰り返してきた。現在は第 4 世代目の開発を行っており、得られた諸性能は測地測量に耐える値に達しつつあるので、ここにその開発経緯についての概要を

報告する。今回の開発は実用性を検証することに力点を置いて行った。以下にはその比較測定過程で蓄積した記録をもとに、測定感度の達成度合いを中心に紹介する。ここで得られた諸特性の数値は個体によるバラツキが大きいいため、その詳細は今後性能が安定した段階で改めて報告する予定である。

測定原理とその特徴

傾斜計に使用している XY 磁気センサーの原理とその特徴を簡単に説明する。

XY 磁気センサーは高透磁率のコアにコイルを巻き付けたいたって単純な構造でできており、それに基準の励磁信号を加えて動作させる。このセンサー周辺の磁場が変化するとコア内の磁束密度が変化し、それに伴ってコイルのインピーダンスが変化する。傾斜計はこの性質を利用して測定している。すなわち、単振り子の重りに永久磁石を取り付け、それを水平面に配置した上記コイルの直上に配置すれば、地盤傾斜の変化はコイルに作用する磁場の変化となるので、最終的に地盤傾斜の変化を電気信号として取り出すことが可能となる。地盤傾斜に比例した所要の電気信号を得るには、構成要素の物理定数に関する定量的吟味が不可欠である。

2002 年 9 月 2 日受付, 2002 年 10 月 21 日受理.

* 東京大学地震研究所火山噴火予知研究推進センター,

** 火山噴火予知研究推進センター浅間火山観測所,

*** 地震地殻変動観測センター,

**** 地震地殻変動観測センター富士川地殻変動観測所.

***** 株式会社マコメ研究所.

* Volcano Research Center,

** Asama Volcano Observatory, Volcano Research Center,

*** Earthquake Observation Center,

**** Fujigawa Observatory, Earthquake Observation Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

***** Macome Corporation.

我々の傾斜計に使用している XY 磁気センサーの特徴は、上記コイル 4 個を正方形の各辺に配置していることである。この場合、互に向い合うコイルには逆向きの基準信号が加えられている。任意方位の傾斜信号はこの向い合うコイルの差分として取り出している。この差分を取る操作を行うことにより信号レベルは 2 倍になり、同時に温度など同相成分のノイズを相殺できる。図 1 に上記 XY 磁気センサーを組み入れた傾斜計 CA-3917 型の概略図を示した。ここで紹介するその他のタイプも、その基本構成は同じである。

単振り子は、永久磁石を埋め込んだ重り（ $\phi 19\text{mm}$ ）を針金（ハイテリバー）で円筒形の支柱（ $L=100\text{mm}$ ）上部に吊り下げてできている。円筒の下部にはシリコンオイルが満たされ、振り子のダンパーの役割をしている。測定ヘッドは振り子の支柱と一体になった基礎構造部に固定されている。測定ヘッドと振り子の間隔は 2mm に設計した。地磁気変動などの磁場変動に伴うノイズを補正するため、上記と全く同じ磁気センサーを補正ヘッドとして振り子の上部、図に示す位置に配置した。これら測定ヘッドと補正ヘッドの水平空間での向きは、同一となるように調整・設置される。もちろん、外部磁気に対する測定感度は両センサーヘッドで完全に一致していることが前提である。この測定原理の傾斜センサーは温度係数が比較的大きいので、

傾斜計自体の温度を監視することが大切である。このため温度センサーをケースの上部に取り付けた。電子回路は全て傾斜計上部に示した斜線部分に収納した。外部ケースはステンレスでできており、その他の構成部品にも全て非磁性材を使用している。なお、円筒形のケース（ $\phi 80\text{mm}$ ）は、数 m の静水圧に耐える設計とした。

この傾斜計の特徴の一つは、振り子一つで傾斜 2 成分の信号を取り出すことができることである。そのため、傾斜計全体の構造をシンプルにすることが可能である。また、振り子の長さを大きくとれば、その他は全く同じ仕様で比較的容易に測定感度を上げることも可能である。しかも、そのためにケースの径を大きくする必要がないので、ボアホール型での利用形態に向いている。さらに、現段階でも特別高価な部品は使用していないので、比較的安価に設計することができた。

なお、上記の XY 磁気センサーと同じ動作原理を有するマグネセンサー（商品名）を利用した 1 軸の傾斜計はすでに開発され（石井ほか、1993）、その観測例も報告されている（中尾・平田、1998）。

傾斜計の性能と観測量

我々が火山地域での観測によって検知しようとしている傾斜の大きさとその周期等をもとに、目標とする傾斜計の

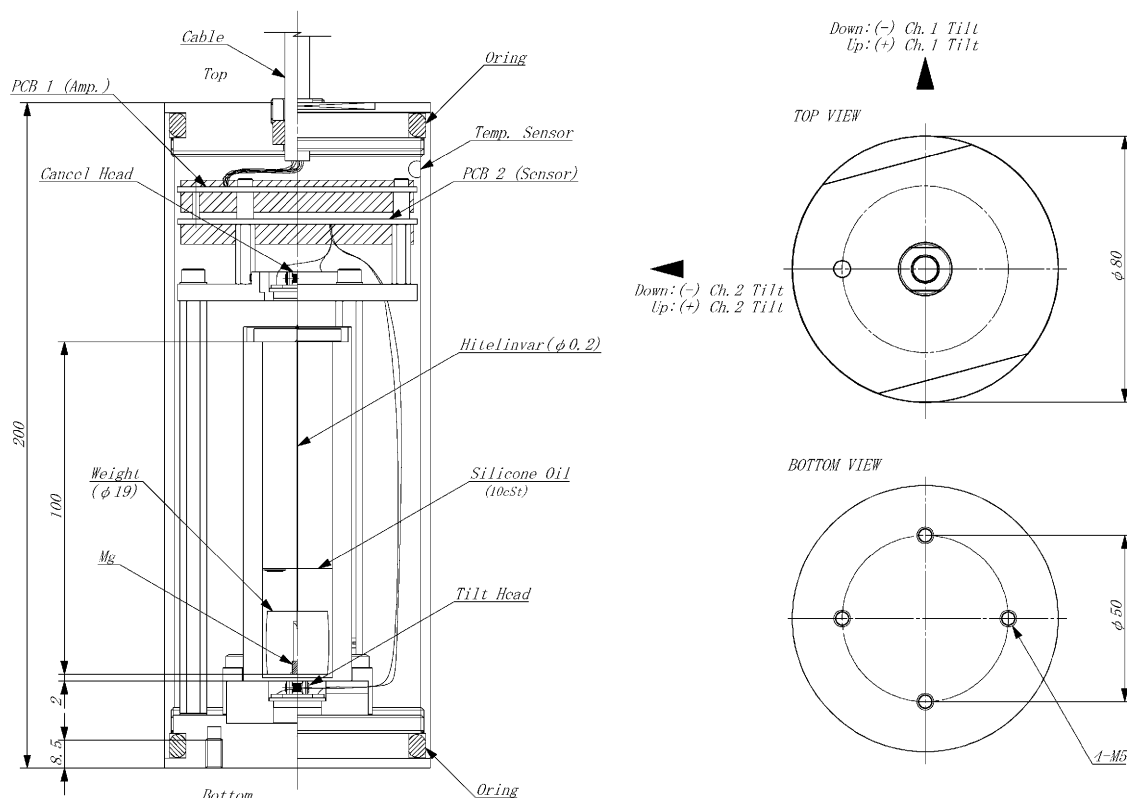


図 1. 傾斜計 CA-3917 型の概略図。観測台への設置には下部に三角基台を固定し、3 本の調整ネジで本体の水平を調整して行う。

性能を表1のように設定した。分解能ないし検知能力は高いに越したことはないが、測定範囲と測定感度との兼ね合いから、比較的容易に達成できると想定された 10^{-8} rad に設定した。この分解能を有すれば、 10^{-7} rad ほどの地球潮汐は検知できる。

表 1. 簡易埋設型傾斜計の設計値

特性	目標
分解能 (μ rad)	0.01
測定範囲 (μ rad)	± 500
カットオフ周期 (sec)	10
零点ドリフト (μ rad/day)	0.01

火山活動に伴う諸現象は、マグマやガスなどの流体が介在する現象であり、一般にその変動の周波数範囲は非常に広くなることが想定される。ただ、数十秒までの短周期成分の変動は広帯域地震計等でも捉えることは可能であり、傾斜計の周波数領域はとりあえず周期 10 sec より長い範囲に設定した。ただし、前述したセンサーそのものは数 100 Hz まで応答可能なので、この値は容易に変更可能である。

零点ドリフトは、どれぐらい長期間の変動を捉えられるかを示す指標である。一応、年間の変動量を数 μ rad 以下に抑えることを目標に、その変化率として 0.01 (μ rad/day) と設定した。傾斜計では、この長期間のドリフトの大きさとその安定性はその他の特性と同様に非常に重要な要素であるが、温度など測定環境に対する応答などと密接に関連しているため、正確な数値の把握は非常に難しい。

以上、この簡易埋設型傾斜計に設定した諸設計値は、現在観測坑内や深井戸等の安定した測定環境下で稼働している測地測量用の傾斜計と比べ、おおよそ一桁ほど低い値である。ただし、地表付近の測定環境下での観測では十分な性能と考えられる。構造が単純で広範な測定周期を有すること、それに器機の取り扱いや設置の容易さに加え、その価格面を加味すれば、利用価値は非常に高いと思われる。

開発の経緯

開発の原型はマコメ研究所の傾斜計 CA-941 型である。この傾斜計は測定範囲が $5-30^\circ$ 角に設計されており、主に工業・民生用途に開発された製品である。我々の開発している傾斜計は、測定原理や基本構成はこれと全く同じであるが、高感度・高安定性である点が大きく異なる。測定範囲や設置環境及び取り扱いの観点から、CA-941 型とは全く別物といえる。

しかし、ここで紹介する傾斜計にも CA-941 型に使用されているセンサーをそのまま流用している。傾斜計の測定感度を中心として設定した各種性能は、このセンサーを使用する限り極限に近い段階に達していると推定される。測

定性能が極限に近くなると、その開発手法は試行錯誤的、かつ消去法的な過程をたどらなければならない。この観点からも、ここに第1世代からの改良点を整理しておくことは今後の貴重な参考資料になるであろう。ただし、その経緯の詳細は煩雑になるので、主な改良項目についての変遷を略記する。表2にその様子を示した。

表 2. 傾斜計の主な性能項目で見た開発ステップごとの変遷

開発ステップ	I	II	III	IV
開発年	1998	1999	2000	2001
CA-3シリーズ*	3672	3774	3854	3917
出力感度 (mV/ μ rad)	0.1	1	2	10
分解能 (μ rad)	0.5	0.1	0.1	0.01
外径 (ϕ mm)	32	50	60	80
温度センサー (mV/ $^\circ$ C)	—	7.5	10	10
電源電圧 (V)	± 12	± 12	+12	+15
消費電力 (mA)	10	40	60	90
外部磁界	—	アモルファス	アモルファス	補正
振り子	ビ°アノ線	ビ°アノ線	エリンバー	エリンバー
シリコンオイル (cSt)	1000	500	E. フィルター	10
発振素子	CR	CR	CR	水晶

第1世代の傾斜計 CA-3672 型は、高感度、低消費電力、ボアホールタイプおよび小型化を目標に製作したプロトタイプ of 傾斜計である。作製された傾斜計は上記の目標をある程度達成しているものの、零点ドリフトが非常に大きく、測地観測用としては全く不十分な性能であった。上記目標は優先順位をつけ順次達成していくほうが望ましかった。すなわち、高感度と高安定性が最初に取り組むべき課題であり、その見通しが立った後に低消費電力化や小型化を目標に設定すべきであった。第2世代からはこの視点に立ち返り、例えば大きさの制限を緩めた結果、第4世代の外径は 80 mm となっている。

第2世代 (CA-3774) では、電子回路の安定化を図った。また外部磁気による影響を遮断する目的で、XY 磁気センサーの周辺をアモルファスフィルムで覆った。その結果、外部磁気の影響を数分の一ほどに減少させることはできたが、設計上、アモルファスフィルムでセンサー周りを完全に覆うことは不可能であることが判明した。また、その効果を高めようとして、アモルファスフィルムをセンサーに接近させ過ぎ、その結果測定系の磁界そのものが歪んでしまい、所要の特性が損なわれることも判明した。

第3世代 (CA-3854) では、長期間のドリフトを小さくする目的で、以下の2点の改善を行った。1点目は、振り子の重りを吊りしている針金をピアノ線からエリンバー線に変更したことである。エリンバー線は、ヤング率の温度係数が非常に小さいなど恒弾性定数を有し、バネ秤のバネ材や時計のひげゼンマイなどに利用されている合金である。2点目は、振り子のダンパー用に使用していたシリコンオイルの使用を止め、その機能を電子回路のハイカット・フィ

ルターで代用させることにした。これは、振り子の動きがシリコンオイルによって乱れている可能性があったためである。ただし、測定地点によっては、振り子の固有周期（約 1.7Hz）付近で比較的長時間振動を継続する現象がみられ、振り子が壁面に衝突するなどして、かえって出力が不安定になることも判明した。

第 4 世代 (CA-3917) では、第 3 世代で実施した比較・実験観測の結果を参考にいくつかの改良を行った。まず、振り子の共振現象を避けるため、振り子のダンパーとして再度シリコンオイルの使用を試みた。ただし、カットオフ周期を 10 秒とすべく動粘度 10 cSt のシリコンオイルを使用した。次に、アモルファスフィルムによる磁気遮蔽を放棄し、逆に外部磁気の変動を測定してそれを補正することにした。そのため、傾斜観測と全く同じ感度に設定した同種のセンサーを補正用に組み込み、両出力の差をアナログ演算回路で処理した。更に、コイルに供給する基準信号の発振素子を CR 素子から水晶発振子に変更し、基準信号の安定化を図った。また、最小分解能相当の信号を安定して収録できるよう、傾斜の出力感度を 10 (mV/ μ rad) に高めた。なお、外部よりの供給電源電圧を 15 V と大きくし、各種電子回路に供給する電源の安定化を図った。

比較・検定観測

上述したように、2000 年の初頭から傾斜計の改良とその実証観測を並行して進めてきた。比較検定の場所は、油壺地殻変動観測所、FUJ 観測点/富士山それに奥山観測点/

富士川地殻変動観測所である。いずれも傾斜計の設置場所は観測坑（横坑）であり、測定環境が安定している。油壺と奥山観測点では水管傾斜計が稼動しており、ここで紹介した傾斜計の記録との比較が容易である。ここでは主に油壺地殻変動観測所、FUJ 観測点で行った比較観測について述べる。

傾斜計の測定性能を検証する方法として、地球潮汐に伴う傾斜変動を記録し、それを理論値や他のセンサーと比較する方法がある（志知・岡田, 1979）。地球潮汐の振幅は、内陸部で 1×10^{-7} rad 前後、海岸付近では海洋潮汐の影響で 1×10^{-6} rad 前後となる。

以下に示す傾斜記録は、特に断りのない限り 1 sec サンプリングのデータをカットオフ周期 10 sec のフィルターで処理し、1 min 間隔で収録したデータを元に作成した。傾斜の極性は明示されていないが、全て統一的（下向きが沈下）に図示している。

以下、測定感度の改良とその安定化を主要なテーマとして、3 つの観測例を紹介する。

(1) CA-3672 型と CA-3774 型

図 2 に、傾斜計 CA-3672 型と CA-3774 型で収録された記録例を示す。2000 年 1 月 20 日から 5 月 9 日にかけて油壺観測所で収録した傾斜記録である。

同図には、比較のため油壺観測所で常時観測されている水管傾斜計「WTT」の記録を示した。傾斜計 CA-3774 型の記録の中で、2 月 2 日のステップ状の変動は手でゼロ調節を行った結果である。また、3 月 14 日の記録のステッ

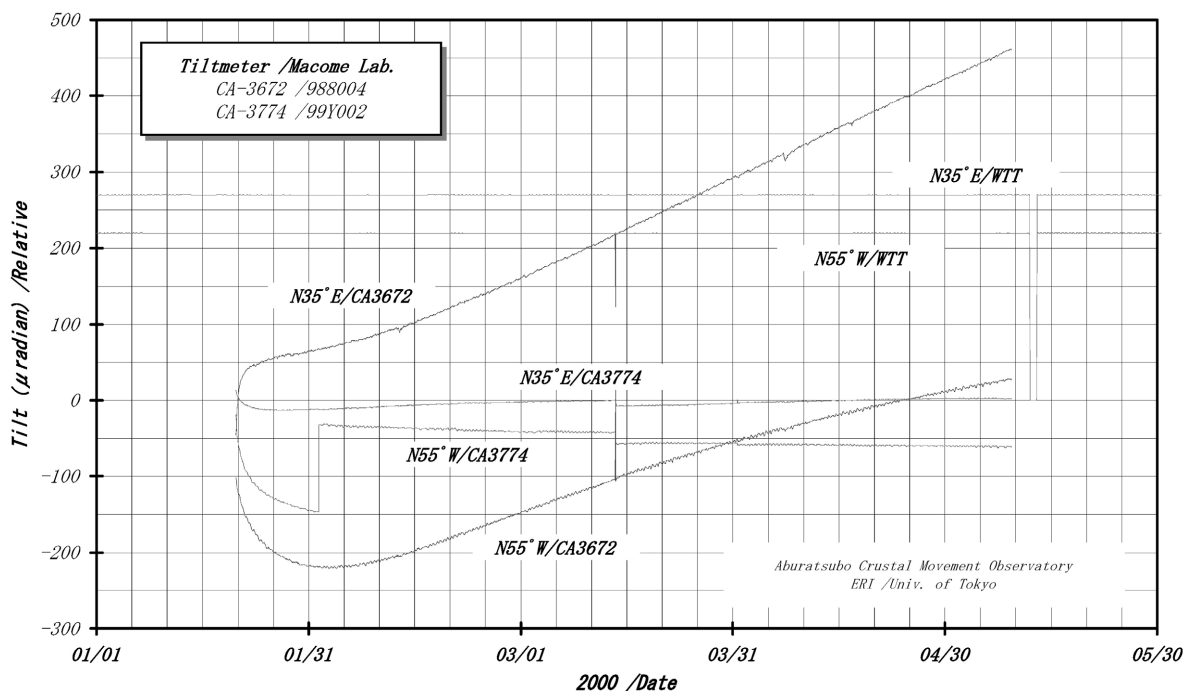


図 2. 油壺観測所において傾斜計 CA-3672 型と CA-3774 型で得られた傾斜記録。測定期間は 2000 年 1 月 20 日から 5 月 9 日まで。

プは、供給電源が20分余の間切断されて生じたものである。水管傾斜計の記録は、5月12日から13日の間欠測している。

各傾斜計のドリフトの大きさについて比較する。傾斜計設置後の10日間は設置に伴う初期ドリフトであると見なし除外し、2月1日から140日間の各傾斜計のドリフトはおおよそ、CA-3672型では数 $100\mu\text{rad}$ 、CA-3774型では数 $10\mu\text{rad}$ 、水管傾斜計では数 μrad となる。設置場所が同一坑内とはいえ、水管傾斜計はその基線長が25mほどあり、設置位置も違っているので、同一基準で比較するにはそれなりの注意が必要である。しかし、上記に示した桁違いの開きは個体差によるバラツキを考慮しても明らかに有意な違いと認められる。この図から、CA-3774型の零点ドリフト($0.1\mu\text{rad}/\text{day}$)は、CA-3672型に比べ約一桁改善されたことが分る。

測定分解能は、図2の表示スケールでは読み取れないが、両傾斜計とも $1\mu\text{rad}$ 以下であることが確認できた。ただ、傾斜計CA-3672型の記録が示すように、1日の零点ドリフトが $1\mu\text{rad}$ と大きいため、この傾斜計で油壺観測所で卓越している振幅 $1\mu\text{rad}$ 半日周期の傾斜変動を観測しても価値ある記録とは言い難い。

(2) CA-3854 型

第3世代の傾斜計CA-3854型を用いて、2000年11月21日から2001年9月20日まで約300日の間、油壺観測所で収録された傾斜記録を図3に示す。この機種で改良した項目は、前述したように振り子にエリンバー線を使用したことと、振り子のダンパーをシリコンオイルから電子回路ハイカット・フィルターに変更したことである。

図3には、水管傾斜計の記録は載せていないが、同期間の傾斜変動は $N35^\circ E$ 、 $N55^\circ W$ 成分共 $2\mu\text{rad}$ 以内と測定されている。また、海洋潮汐に起因する日変化の両振幅は $N35^\circ E$ 、 $N55^\circ W$ 成分共最大で $1\mu\text{rad}$ 程度と観測されている。それに比べ、CA-3854A型で観測される $N55^\circ W$ 成分の振幅は $3\mu\text{rad}$ 程であり、これは水管傾斜計の約3倍の大きさに相当する。油壺観測所の観測横坑は海岸に接して造られており、センサーの設置位置とその測定基線の違いによって測定される傾斜量が異なる可能性は高い(Yanagisawa, 1980)。そこで、傾斜計の設置方位を 90° 回転させて、すなわちXY成分を入れ替えて測定した。その結果、上記の大きさが傾斜計を設置した観測台の傾動に間違いなことを確認した。

これまでの試験観測から、地磁気の変動によるノイズが

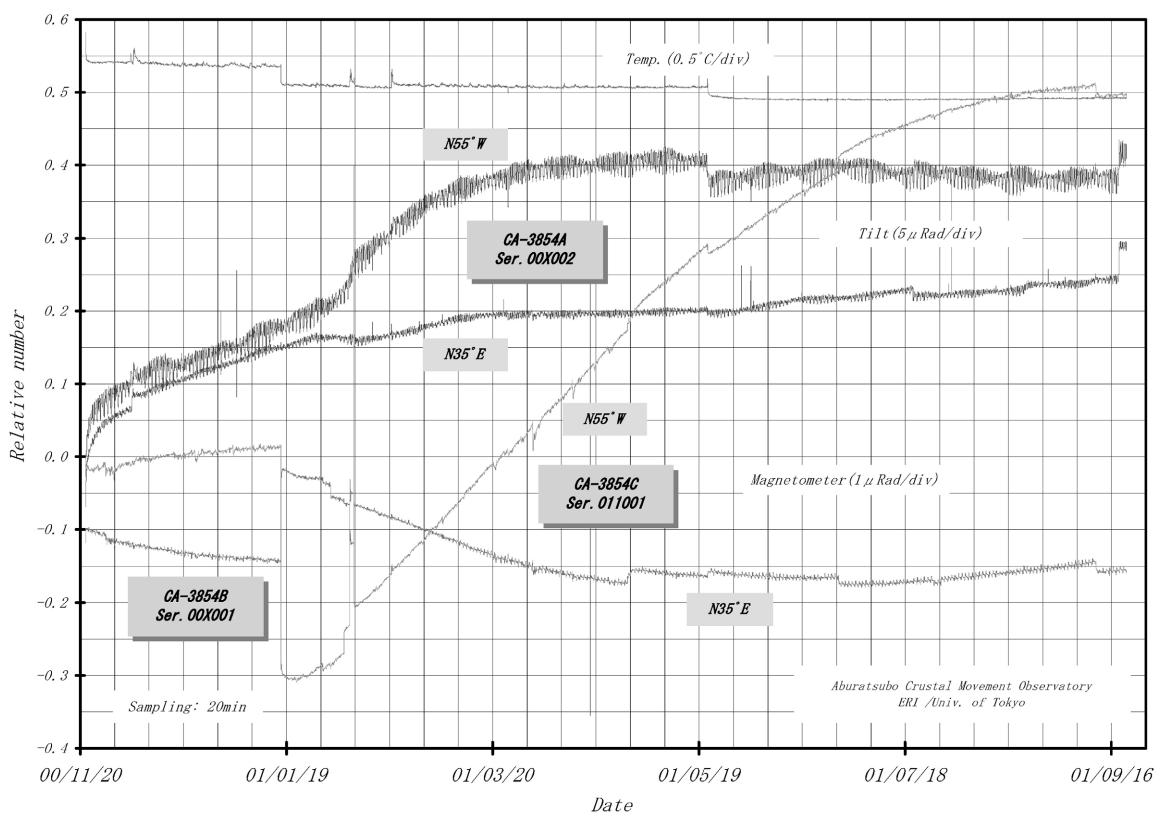


図3. 油壺観測所において傾斜計CA-3854A型で得られた傾斜記録。測定期間は2000年11月21日から2001年9月20日まで。傾斜計CA-3854B型とCA-3854C型は、傾斜計に対する外部磁気の影響度合いを検証する目的でCA-3854A型と並行測定した。CA-3854B型の測定期間は2000年11月21日から2001年1月17日まで、CA-3854C型のそれは2001年1月17日から9月20日まで。測定内容の詳細は本文参照。

比較的大きいことが推察された。そこで地磁気の変化がセンサーに与える影響を評価する目的で、次のような観測を行った。CA-3854B 型は振り子を取り外した機種であり、1 月 18 日まで並行観測を行った。また、CA-3854C 型は振り子を物理的に固定した機種で 1 月 19 日より測定を行っている。これら両機種は、結果として外部磁気の水平 2 成分を測定する磁力計と同じ働きをする。ただし、ここで使用している単位は傾斜単位 (μrad) のままとされている。これは、傾斜計として検定調整した感度をそのまま流用したからであり、むしろ外部磁気の影響度合いを評価するのに都合が良いのでそのまま使用している。

この両機種 (B と C) は、外部磁場すなわち主に地磁気の変化がセンサーに与える影響を評価する目的で測定したが、実際には傾斜計近傍の人工的な磁場変化も当然のごとく重畳していることが判明した。図 3 から、地磁気の日変化が傾斜観測量に与える影響（誤差）はおおよそ $0.2\mu\text{rad}$ 程度であることも判った。なお、CA-3854C 型の $N55^\circ W$ 成分は明らかに異常なドリフトを示している。これは振り子の固定方法に問題があったためと考えられる。

図 3 には、各測定量にステップ状の飛びが多数認められる。その原因としては以下のことが考えられる。

- a) 供給電圧の変動
- b) 観測坑内での各種作業に起因する変動（特に温度変化）
- c) 外部磁場の変化
- d) その他

ここでは、上記した原因の詳細は省略するが、これら全ての原因とその対策について検討が加えられ、第 4 世代の改善に生かされている。

(3) CA-3917 型

図 4 は、第 4 世代の傾斜計 CA-3917 型で得られた記録例である。観測場所は図 3 と同様に油壺観測所である。この傾斜計の主な改良は第 3 世代での比較観測の結果を踏まえ、外部磁場の変動に起因するノイズを補正する機構を設けたことである。同図の記録例では、この外部磁場による傾斜測定値の補正の効果を明瞭に示すため、あえて磁気嵐が発生している 2001 年 11 月 24 日と 25 日を選択した。この磁気嵐は、振幅が数 100 nT で 12 時間ほど激しく変動したあと約 3 日を経過して元のレベルに戻るといって、相当規模の大きい磁気嵐であった。

図 4 で、「WTT」は水管傾斜計の傾斜変動を、「Corrected data」は傾斜センサー出力「Raw data」と磁力センサー出力「Magnetometer」の差分を示している。この差分はアナログ回路で生成され、外部磁場の変動を補正した傾斜出力となる。ここで示した出力「Raw data」と「Magnetometer」は検定用に用意した出力であり、傾斜計の信号としては通常この出力は利用しない。図 4 の最上部

に描いた 3 本が $N35^\circ E$ 方位の傾斜信号であり、その下の 3 本が $N55^\circ W$ 方位の傾斜信号を示している。

「Kakioka」は柿岡地磁気観測所（気象庁）で測定された地磁気要素をもとに、傾斜計の設置方位と同方向の水平成分に換算して表示した。図から明らかなように、両者はおおよそ数 nT 単位で一致していることが判る。もちろん、油壺で測定された値には、柿岡には存在しないその場所固有の地磁気成分および人工的のノイズが重畳しているので完全には一致しないが、ここでは「Magnetometer」で得られた地磁気変動の測定値の信頼性を確認することとその絶対値を推定するために描いてある。

ここで、「Corrected data」と「Raw data」の記録を比較すると、「Corrected data」の記録すなわち CA-3917 型傾斜計の出力信号は外部磁場の変動「Magnetometer」の影響を正確に補正できていることが明らかである。なお、同図では柿岡の地磁気要素だけが (nT) 単位で示しており、他は全て rad 単位である。この図を参照すれば、傾斜計 CA-3917 型における外部磁気変動と傾斜補正量との関係はおおよそ ($1\text{rad}=400\text{nT}$) 程度であることが読み取れる。

以下、傾斜変動記録の内容について若干説明を行う。CA-3917 型の記録と「WTT」の記録とは短周期成分の変動は明らかに違っている。この相違は両測定系の動特性の違いにより生じているものである。また、 $N55^\circ W$ 成分に認められる 3 倍程度の振幅の違いの理由については図 3 の説明ですでに述べている。「WTT」の記録に明瞭に観察される周期 (12-13) 分の傾動は観測横坑に隣接する油壺湾の静振 (Seiche) に伴う傾斜変動である (Yanagisawa, 1980)。なお、「WTT」の記録はフィルター処理のため、500 秒の時間遅れが生じており修正した。また、「WTT」と CA-3917 型の傾斜出力信号において両観測成分共その極性は逆転しており CA-3917 型に合うよう処理している。

これまでは大規模な磁気嵐による傾斜計への影響を述べてきたが、次に通常の日変化（おおよそ数 10 nT）に伴う影響例を示して説明する。ここでは、富士山南西山麓の FUJ 観測点で収録した記録を紹介する。油壺では海洋潮汐による傾斜変動が常時 $1\mu\text{rad}$ ほどで観測されかつ短周期成分の信号も大きいので、上記の地磁気変化による傾斜計の補正効果を確認しにくいからである。

図 5 は FUJ 観測点において傾斜計 CA-3917 型で測定された 2002 年 4 月 25 日から 27 日の 3 日間の記録である。この図では、上部に示す 4 記録が (E-W) 成分を、下部に示す 4 記録が (N-S) 成分を示しており、参考のため各成分の最下端に柿岡地磁気観測所で観測された地磁気水平成分を示した。「Corrected data」が地磁気補正された傾斜計の出力信号であり、図 4 と同様に「Raw data」と「Magnetometer」の差である。ただし、傾斜出力と「Magne-

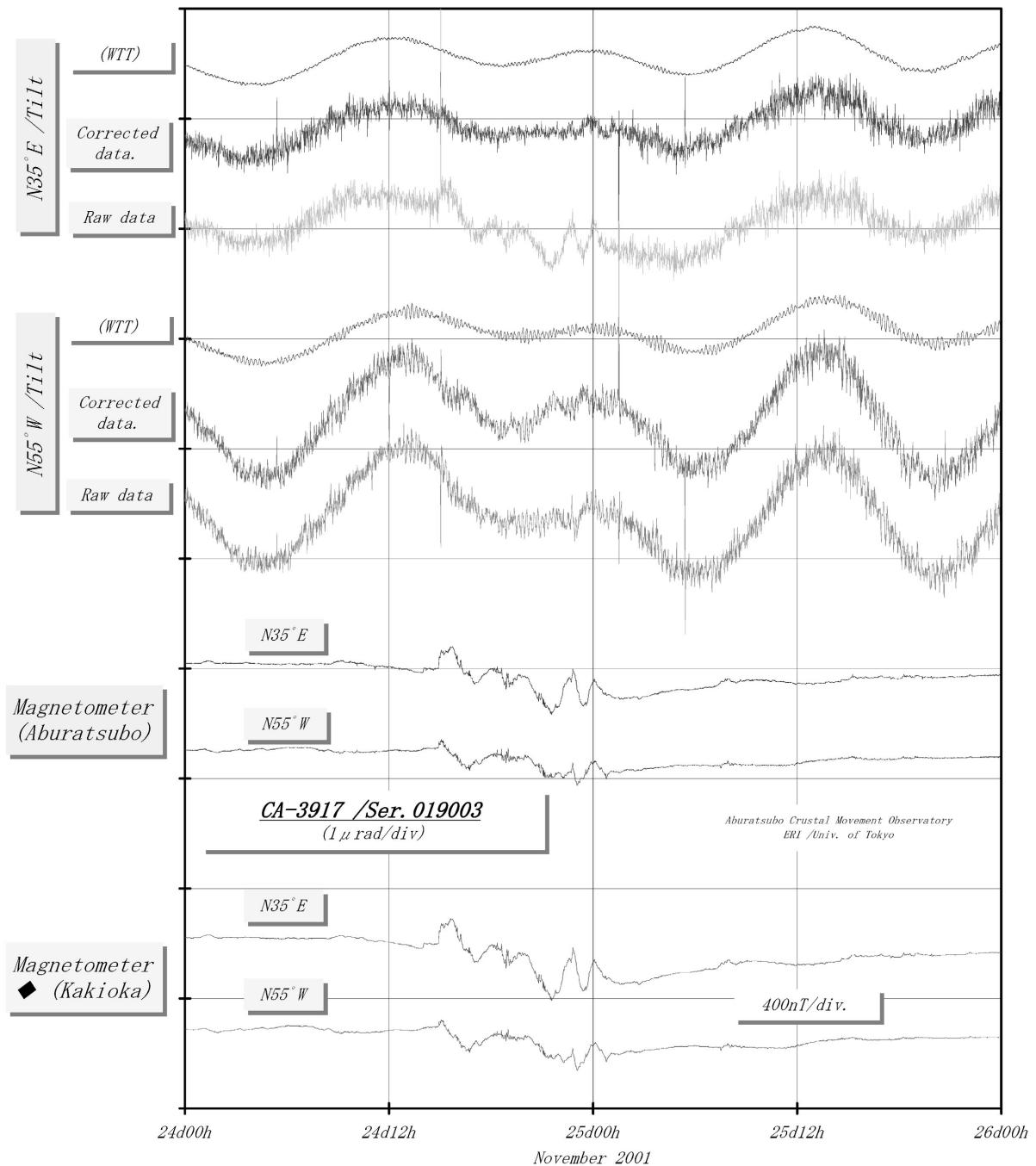


図 4. 油壺観測所で傾斜計 CA-3917 型で得られた 2001 年 11 月 24 日と 25 日の傾斜記録. N 35°E 方向の WTT は油壺観測所で常時観測されている水管傾斜計の変動を, Corrected data は磁気補正された傾斜計の出力を, Raw data は傾斜計の生の変動 (測定ヘッドの出力) を示している. N 55°W 方向の描き方もこれと同じ並びである. Magnetometer は傾斜計の磁気センサーが捉えた外部磁気の変化を示している. 最下段の 2 成分は柿岡地磁気観測所で得られた地磁気変動を示す.

tometer」の出力では図中のスケールに違いがある. なお, 傾斜変動に共通してみられる右上がりの傾動は, 傾斜計設置後の初期ドリフトを示している. ちなみに, (E-W) 成分大きさは約 $0.1 \mu\text{rad/day}$ 以下, (N-S) 成分のそれは約 $0.2 \mu\text{rad/day}$ 程である.

この図から, 「Raw data」信号に含まれる地磁気変動の影響による成分が「Magnetometer」信号で正確に補正さ

れていることが明瞭に読み取れる. ただ, (N-S) 成分の「Raw data」と「Corrected data」の比較では補正効果の視認は難しい. これは「Raw data」と「Magnetometer」の変動がたまたま同相的な変動をしているからであり, 数値処理上はその補正に何ら問題は生じていない.

「Corrected data」信号の示す変動・約 $2 \times 10^{-7} \text{ rad}$ は地球潮汐による傾斜変動であり, この信号から傾斜計の分解

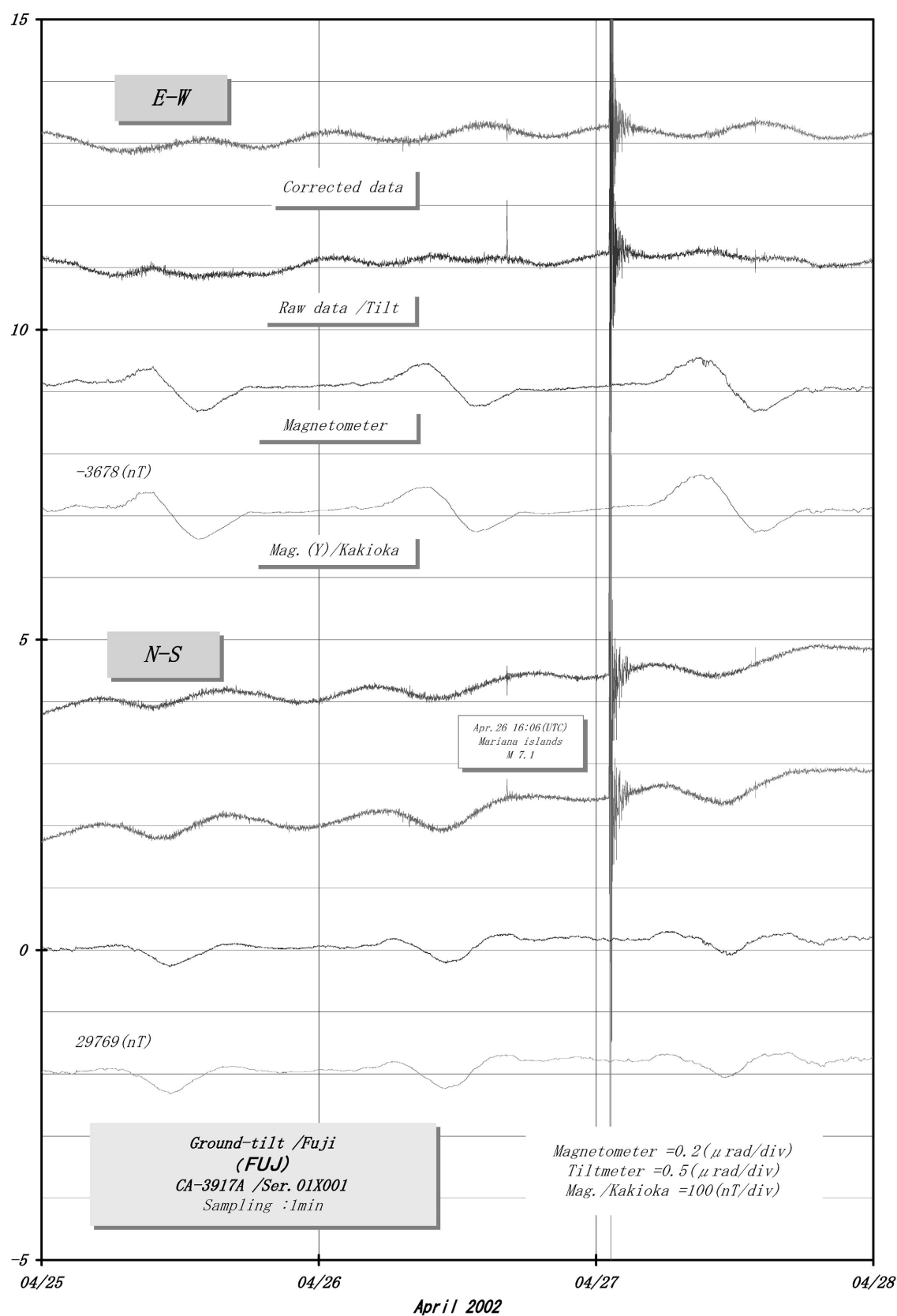


図 5. 傾斜計 CA-3917 型を用いて FUJ 観測点（富士山）で捉えられた 2002 年 4 月 25-28 日の傾斜変動. (E-W), (N-S) 両成分とも最下段の変動は柿岡地磁気観測所で得られた地磁気変動を示す. なお, 各成分で測定単位に違いがあり, それを図中に指した.

能が 10^{-8} rad 程度であることが推定できる。

また図 5 には、4 月 27 日 1 時頃の大振幅の傾斜変動が記録されている。これは、2002/04/26 16:06 (UTC) にマリアナ諸島で起った M7 の地震動による傾斜記録である。ここで地震動を示したのは、傾斜計の過大入力に対する応答に注目したいからである。すなわち、傾斜計の性能の一つとして、過大入力に作用した前後で記録にステップ状の変動すなわち永久歪が残らないことが重要である。上記地震で測定された最大傾斜振幅は $10 \mu\text{rad}$ (p-p) であり、この程度ではもちろんステップは生じていない。

火山活動に起因する地殻変動は、その振幅と周期の分布幅が非常に大きいので、過大入力や振り子の共振等によって傾斜計の構造に永久歪が生じる可能性が高いことはすでに指摘した。したがって、この耐衝撃性能とも言うべきファクターは重要である。上記の傾斜計 (Ser. 01X001) は、設置以来 3 ヶ月余り近地地震などによって比較的大きな加速度と振幅を経験してきたが、これらの入力によるステップ状変動すなわち記録の飛びは、今のところ認められていない。

まとめと今後の課題

CA-3 シリーズの傾斜計は、岩手山、三宅島そして富士山において観測実績があり、これら火山での観測と同時並行して諸特性の更なる安定性と測定精度の向上を目指し、比較・検証観測を実施してきた経緯をこれまで概観した。その過程で、磁気センサーを使用するこの型の傾斜計は、その測定原理から外部磁場の変動による影響を消去する機構が必要不可欠であることが判明した。第 4 世代の傾斜計 (CA-3917) はこの補正機構を装備しており、現段階で 10^{-8} rad 以上の分解能を有することが確かめられた。

図 6 に、これまでの開発過程を模式的に図示した。

この図では縦軸に測定感度を横軸にドリフトを示し、開発の元となった傾斜計 CA-941 型と第 1 世代から第 4 世代の傾斜計が性能的にどの位置を占めるかを表している。横軸のドリフトはその蓄積量の変化率 (rad/day) で表示している。もちろん、図の右上側がより高精度・高安定性の機器であることを示す。各機種のパフォーマンスはある範囲で示されているが、これは固体ごとに性能のバラツキが大きいことを示すものであり、その大きさや形に特別な意味はない。測定感度がおおよそ 1×10^{-7} rad 以上の領域では、地磁気変動の影響が無視できなくなることを色の違いで示した。また、比較観測で測定感度の指標とした半日潮の地球潮汐

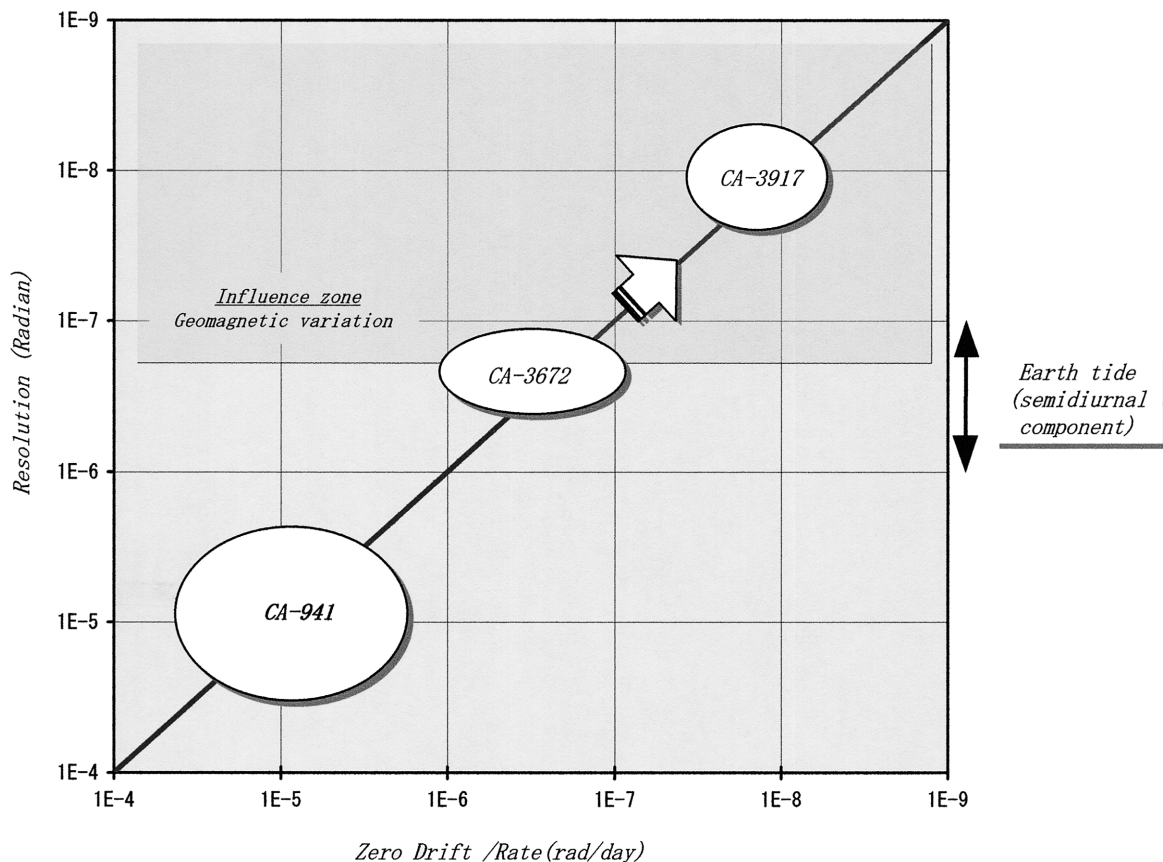


図 6. 傾斜計の基本的性能である分解能とドリフトを XY 軸として、各傾斜計の位置をプロットした。図の右上方向がより高性能な傾斜計であることを示す。

に起因する傾斜の大きさを参考のため図示した。第2世代（CA-3774）と第3世代（CA-3854）の傾斜計は、図示した第1世代（CA-3672）と第4世代（CA-3917）の間に描かれることになる。

上記したように、CA-3917型の性能は開発の目標を達成しつつあるので、今後は動（周波数）特性や外部環境の変化による安定性の評価などを改めて検証する予定である。すでに測定感度の検定用装置は作製済みであるが、長期のドリフト特性を始め、単独で決定できる要素は少なく、かつその確定には最低数ヶ月を要する。これらの特性については現在も引き続き検証中である。もちろん、開発を進める過程では、温度や供給電源に対する必要不可欠・最低限の条件は随時確保して来た。個体ごとの特性のバラツキが小さくなった段階で、これまで得られているデータを含めその詳細を改めて報告する予定である。

傾斜計の基本的な性能として、最小分解能、測定範囲、測定周期、長期間のドリフト及び外部磁場・温度などに対する安定性は最低限把握すべき要素である。そのうち温度特性は非常に捉えにくい量であり、感度が高くなると傾斜計の温度が変化したために傾斜変化したのか、傾斜計を設置した土台が傾斜したのか、あるいはその両方なのか判別が難しくなる。これまでの比較・検証観測では、この温度変化が存在しないかあっても非常に小さいと仮定して、諸特性を追求してきている。

今後の改良点は、振り子支持部の工夫、消費電力の低減化や信号伝送系の安定化などである。特に、長期間のドリフト特性の向上にはもう一段の努力が必要であろう。取扱

い・操作上の課題としては、振り子のクランプ機構の設計や耐衝撃性能および耐圧性能の向上等の課題が残っている。傾斜計の外ケースは、ボアホールへの設置を念頭に筒型の形状を踏襲してきた。しかし、振り子を使用しているため原理的に横長構造の設計はできないなどの制約はあるが、設置場所に適した設計も適宜取り入れるべきであろう。

現在、三宅島と富士山では第3世代の傾斜計（CA-3854）が稼動中である。ただ、傾斜観測の成否はその観測対称とする信号の性質にもよるが、設置場所の測定環境に左右される度合いが非常に大きいので、その選定には十分注意を払う必要がある。

謝 辞：投稿にあたり岩崎貴哉教授、森田裕一助教授には査読をしていただき、原稿の改善に役立ちました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- 石井 紘・山内恒生・松本滋夫・平田安廣・鈴木喜吉・高橋辰利・若杉忠雄・渡辺 茂・陳 光斉, 1993, 震研93型平行二枚バネ式可搬型傾斜計の開発と観測, 地球惑星科学関連学会1993年合同大会予稿集, C12-02.
- 中尾 茂・平田安廣, 1998, 震研93型平行二枚ばね式可搬型傾斜計と水管傾斜計の比較観測, 地球惑星科学関連学会1998年合同大会予稿集, 105.
- 志知龍一・岡田義光, 1979, 坑内における歪観測, 測地学会誌, 25-2, 101-134.
- Yanagisawa, M., Observations of Seiche-Related Tilt in the Aburatsubo Observatory, 1980, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 55, 331-345.