

# 筑波地震観測所における機器の撤去作業 および水銀系廃棄物の回収・分析に関する報告

外西奈津美<sup>\*†</sup>・芹澤正人<sup>\*\*</sup>・増田正孝<sup>\*\*</sup>

## Dismantling of Water Tube Tiltmeters and Elemental Analysis of Mercury Contents at Tsukuba Seismological Observatory

Natsumi HOKANISHI<sup>\*†</sup>, Masato SERIZAWA<sup>\*\*</sup> and Masataka MASUDA<sup>\*\*</sup>

### はじめに

本稿では、筑波地震観測所に設置された読み取り型水管傾斜計の撤去に関する業務について報告する。読み取り型水管傾斜計の撤去は、筆者らにとって初めての業務であり、撤去の過程やその方法について記録を残すことを目的としている。また、撤去の過程で生じた水銀系廃棄物の回収方法や分析方法および結果についても広く共有し、今後の業務に生かしていくことも目的としている。その他、本業務で知った観測所の歴史や、地殻変動観測に用いられた機器の変遷についても簡単に紹介する。

### 筑波地震観測所について

筑波地震観測所の前身は、震災予防調査会によって1921年に設立された筑波山微動観測所である。1923年の関東大震災を契機に1927年に東京大学地震研究所へ移管され、以降筑波山支所として永く運用されていた(萩原, 1975)。1975年に筑波地震観測所となり、現在に至るまで様々な観測・実験が行われている。

表1は観測所で運用された観測機器のうち、過去の文献等(渡邊ほか, 1996; 岩田・野口, 2000)に記載された主要な機器の一覧である。\*印の計測機器は、いずれも地震研究所関係者によって新しく開発され、地殻変動観測分野における研究に用いられてきたものである。これらの機器

以外にも、様々な研究機関が新しく開発した機器を持ち込み、観測・実験を行ってきている。本稿で取り上げる水管傾斜計を含む、近代地震学の発展に多大な影響を与えたこれらの機器は筑波地震観測所がそのテストフィールドとして重要な拠点となっていた。参考資料1として筑波山支所当時の局舎等配置図、および参考資料2として同時期の資料と思われる地中壕の設計図を示す。

### 地震研究所における地殻変動観測の歴史と現状

1960~1970年代には横坑式地殻変動連続観測と光波測量が主体であった。この間に岡田義光氏による標準観測方式が確立され、全国的に波及した。1980年代には第4次地震予知計画による「地殻活動総合観測線」が南関東地域の岩本山、真鶴、松田、清川、相模原、高津、検見川で実施された(東京大学地震研究所地殻変動研究部門富士川地殻変動観測所・油壺地殻変動観測所, 1981)。また、縦坑式ひずみ・傾斜観測が始まり、GPS観測も導入されるようになった。石井式ボアホール総合観測装置(石井ほか, 2001)が開発され、1つの観測点で多成分観測が行えるようになった。1990年代以降はGPS観測が主流となり、現在は国土地理院によって全国的なGPS観測網(GEONET: GNSS連続観測システム)が運用されている(国土地理院ウェブサイト)。

以上のように、現在も続く計測機器の研究開発により、観測機器や通信技術の高度化・小型化が進んでいる。それに伴い、地震研究所所有の観測所の役割も時代とともに変わってきている。1998年頃からの筑波地震観測所の無人化に伴い、敷地内の建屋等の整理が進められている。2021年度には、筑波地震観測所の全ての建屋の撤去方針が決定し、2023年度末を目処に実施される見込みである。現在、敷地内の地殻変動観測壕(横坑)には、読み取り型水管傾

2022年9月16日受付, 2022年10月13日受理.

<sup>†</sup> hokanishi@eri.u-tokyo.ac.jp

\* 東京大学地震研究所技術部技術開発室

\*\* 東京大学地震研究所技術部総合観測室

\* Laboratory for Technical Support, Technical Division, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

\*\* Technical Supporting Section for Observational Research, Technical Division, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

表 1. 観測所で運用された主要な観測機器の一覧

機器名	運用期間および観測成分等
*大森式微動計	・1922~32年 水平動2成分
*石本式シリカ傾斜計	・1927年 ひずみ
*石本式水平動加速度計	・1932~96年頃 加速度
*石本式上下動加速度計	・1932~96年頃 加速度
*萩原式変位計	・1933~49年 試験観測（小ドックリ型）水平動2成分 ・1949~96年頃 水平動2成分
*水管傾斜計（読み取り型）	・1935~98年頃 東西成分
コロンビア型長周期地震計	・1957年（国際地球観測年, IGY: International Geophysical Year; 1957~1958）
*萩原式電磁地震計5万倍型（HES1-1型）	・1956年 水平動2成分 ・1958年~ 上下動1成分を追加 ・1982年~ 倍率を1万倍に変更
*萩原式電磁地震計15万倍型（HES1-0.2型）	・1958~85年 3成分 ・1984~96年頃 3成分 後継の地震計としてMTDV-1（上下動換震器）およびMTDH-1（水平動換震器）に変更
*萩原式電磁地震計1800倍型（HES1-20型）	・1958~85年（IGY）3成分 ・1984~96年頃 3成分, 倍率は5千倍 後継の地震計としてPELS Type 73（小型可搬長周期地震計）に変更
プレス-ユーイング型長期地震計	・1958~93年 光学式3成分
ウッド-アンダーソン捻れ地震計	・1958~75年 光学式水平動2成分
中周期地震計	・1990-91年まで実験観測（5.0秒）

\*は地震研関係者によって製作された計測機器を示す

斜計やSTS-1, MTDV-1 および MTHV-1 の地震計が設置されている。1998 年代頃には、読み取り型水管傾斜計を用いた観測は終了しており、今回、傾斜計を撤去することが決まった。しかし、今後も観測拠点として、観測所敷地内の各種定常観測は維持する方針である。

### 水管傾斜計について

水管傾斜計はひずみ計と共に地殻変動連続観測に用いられる機器である。これまでに両機器を用いた観測から、さまざまな研究成果が報告されている。例えば、笠原（1977）などが移動性地殻変動を発見している。また地震の前兆的な変動を捉えた事例として笠原（1981）や Yamauchi（1989）など多数の報告がある。火山学の分野においても、火山活動に伴う変動の検出とダイク貫入の可視化が Aoki *et al.*（1999）によって報告されている。近年では、深部低周波微動やスロースリップイベントに伴う傾斜変動の発見（小原，2007）などが挙げられる。しかし、両機器の役割

は GPS による地殻変動連続観測網の発展により、置き換えが進んでいる。

読み取り型水管傾斜計のポットの構造を図 1 に、傾斜計の構造を図 2 に示す。2つの水タンク（便宜上、横坑入り口側の水タンクを front ポット、横坑奥側の水タンクを back ポットとする）をガラス管でつなぎ、それぞれのポットの液面の変動差から鉛直方向の変動を測定し、離れた 2 地点間（約 20m）の傾斜角の変動を測定している。ポット内の液面と読み取り針（マイクロメータ）が一致するようにマイクロメータの先端を操作し、その値を 1/1000 mm まで読み取る。マイクロメータはポット内の台座にネジ式で固定されており、そのネジ穴から封入水が漏れるのを防ぐため水銀が封入されている。長年、傾斜計内の水はその水銀と接した状態になっている。

### 水銀の性状および排出基準

水銀は常温・常圧下で唯一の液体の金属元素である。水

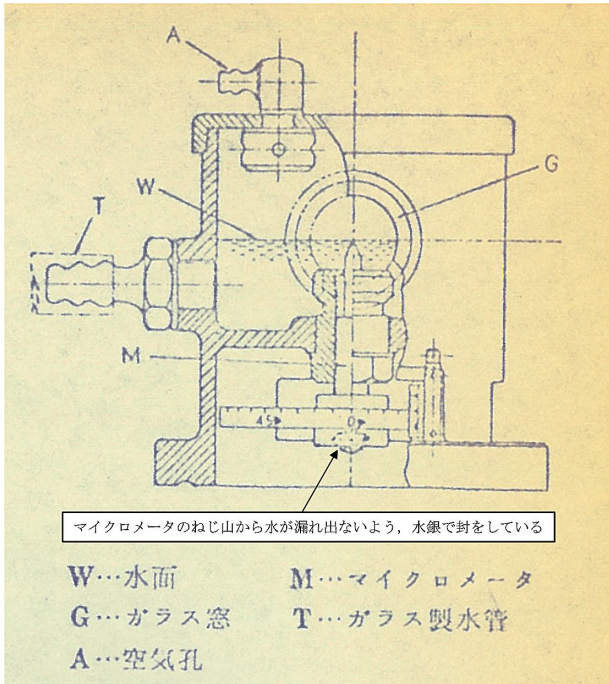


図 1. 萩原式読み取り型水管傾斜計のポットの構造 (笠原 (1972) より抜粋・加筆)

銀は空気中で容易に気化し、その蒸気は人体・環境に対して非常に毒性が高い。水銀蒸気に暴露された場合、肺から吸収された水銀は血液に取り込まれ、全身に拡散・循環する。急性毒性の観点では、呼吸器系や腎臓機能に障害をおよぼす。また長期にわたる、または反復暴露の観点では、中枢神経系や末梢神経系に影響を及ぼすことが知られている。

水銀は蛍光灯や水銀気圧計・温度計など身近な製品に多く含まれるため、取り扱いには細心の注意が必要である。水銀を含む物質や製品を処分・廃棄する場合には、環境基準法（第3節 環境基準）第16条に定められた環境基準（排水基準：0.005 mg/L 以下、土壌含有量基準：15 mg/kg 以下）に則り、適切に処理することが求められる（環境省ウェブサイト）。廃棄作業中、誤って環境中に暴露してしまった場合には、地中や地下水への汚染を防ぐため、床材や土壌の削りを行う場合もある。水銀で汚染された場所を完全に除去する必要があるため、これらの作業には大変な労力を伴う。

東京大学では、この基準に則った環境安全指針（東京大学環境安全本部、2020）が定められ、適切に処理を行うことが求められている。このため、傾斜計の撤去に伴う事前調査として、2つのポット（横坑入り口と横坑奥）内の水および水管結合部直下の土壌を一部採取し、水銀および各種微量元素の濃度分析を行なった。

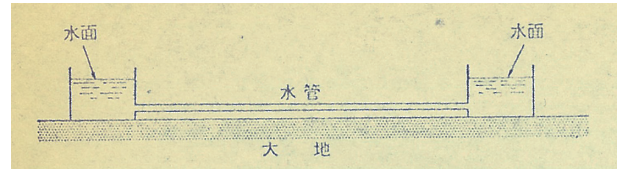


図 2. 読み取り型水管傾斜計の構造 (笠原 (1972) より抜粋・加筆)

## 水銀含有物の元素濃度分析

本分析には誘導結合プラズマ質量分析法 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: ICP-MS) を用いた。ICP-MSはアルゴンガスに高周波電力を印加して生成した誘導結合プラズマをイオン化源とし、生成したイオンの質量数およびイオン強度を測定する質量分析法の1つである。試料は溶液化されたのち、ネブライザーによりエアロゾル化してプラズマに導入される。試料溶液中の各元素はプラズマ中で脱溶媒、気化、原子化の工程を経てイオン化される。生成したイオンはインターフェイス、イオンレンズを通過し、質量分析計で質量電荷数比 ( $m/z$ ) に応じて分離され、検出器で計測される。原子（検出時はイオン）の質量数から元素の種類が分かり、各元素の信号強度から試料中元素の濃度を求めることが出来る。

## 試料の採取方法および前処理手順

### ・試料の採取方法

2021年5月31日に、水管傾斜計の封入水や土壌の水銀含有量が環境基準に該当するかどうかを分析・評価するための試料採取を行った。封入水については、ポットの蓋を開け、開口部からスポイトを用いて試料を15 ml程度採取し、ポリビンに回収した。水試料は横坑入り口と横坑奥の両ポットからそれぞれ回収している。土壌については、水管の中央接合部分直下の表土からスコップを用いて30 g程度採取し、ポリビンに回収した。

### ・水試料の調製手順

- 1: 不純物を取り除くため、シリンジにフィルターを取り付け、水試料を濾過する。
- 2: 濾過後の溶液2 mlをテフロンビーカーに測り取る。
- 3: 内標準として、SPEX社製のインジウム (In) とビスマス (Bi) の標準溶液を2で濾過した溶液中の濃度が5 ppbになるようそれぞれ加える。
- 4: 濃度2%に調製したUltrapure™規格の硝酸 ( $\text{HNO}_3$ ) 水溶液を用いて、溶液総量が10 mlになるよう希釈する。

### ・土壌試料の調製手順

- 1: 試料を60℃のオーブンで一昼夜乾燥させる。



- 2: 乾燥重量 1 g をテフロンビーカーに測りとり、濃度 2% の  $\text{HNO}_3$  水溶液を用いて溶液総量が 10 ml になるよう希釈し、一昼夜おく。
- 3: 非水溶性の不純物等を取り除くため、水試料と同様に土壌試料の溶液をフィルターで濾過する。
- 4: 濾過した溶液をテフロンビーカーに 2 ml 測り取る。
- 5: 内標準として In と Bi の標準溶液を 4 の溶液中の濃度が 5 ppb になるようそれぞれ加える。
- 6: 濃度 2% の  $\text{HNO}_3$  水溶液で溶液総量が 10 ml になるよう希釈する。
- 3: 2 段階希釈した溶液を 30 ml のポリビンに 1.5 ml 測りとり、内標準として In と Bi の標準溶液を溶液中の濃度が 5 ppb になるようそれぞれ加える。
- 4: 濃度 2% の  $\text{HNO}_3$  水溶液で溶液総量が 30 ml になるよう希釈する。この時の標準溶液中の水銀濃度は 5 ppb である。
- 以上の試料および試薬の調整手順については、稲垣 (2008) を参考に調整を行った。

### 測定条件

元素濃度分析にはベンチトップ型四重極型 ICP-MS XSeries-2 (ThermoFisher Scientific 社製) を用いた。測定条件と測定元素をそれぞれ表 2 と表 3 に示す。測定方法については Nakai (2021) を参照した。

### 測定結果・計算方法および考察

測定の結果、29 元素 34 種類の信号強度が得られた。得られた試料溶液と標準溶液の元素の信号強度を比較し、試

表 2. ICP-MS XSeries-2 測定条件

<u>ICPイオン源</u>	
RF出力:	1.4 kW
トーチ:	ファッセル型
キャリアガス流量:	14 L/min
補助ガス流量:	0.8 L/min
ネブライザーガス流量:	0.86 L/min
ネブライザー:	ガラス製同軸形ネブライザー
スプレーチャンバー, 冷却温度:	コニカルタイプ, 3°C
<u>インターフェイス</u>	
サンプリングコーン:	NiベースのPtチップ製, 1.1 mmオリフィス径
スキマーコーン:	NiベースのPtチップ製, 0.9 mmオリフィス径
<u>データ収集</u>	
獲得モード:	ピークジャンプ
検出モード:	パルス計測モード 3ピーク/点
計測時間:	10 ms/isotope
反復計測回数:	3回

表 3. 測定元素

$^{84}\text{Sr}$	$^{85}\text{Rb}$	$^{86}\text{Sr}$	$^{89}\text{Y}$	$^{90}\text{Zr}$	$^{92}\text{Zr}$	$^{93}\text{Nb}$	$^{94}\text{Zr}$	$^{115}\text{In}$	$^{133}\text{Cs}$
$^{137}\text{Ba}$	$^{139}\text{La}$	$^{140}\text{Ce}$	$^{141}\text{Pr}$	$^{146}\text{Nd}$	$^{147}\text{Sm}$	$^{153}\text{Eu}$	$^{157}\text{Gd}$	$^{158}\text{Gd}$	$^{159}\text{Tb}$
$^{163}\text{Dy}$	$^{165}\text{Ho}$	$^{166}\text{Er}$	$^{169}\text{Tm}$	$^{172}\text{Yb}$	$^{175}\text{Lu}$	$^{178}\text{Hf}$	$^{181}\text{Ta}$	$^{200}\text{Hg}$	$^{202}\text{Hg}$
$^{208}\text{Pb}$	$^{209}\text{Bi}$	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$						

料中の Hg 濃度を算出した。その結果、Hg 含有量は front ポットが 29 ppb, back ポットが 11 ppb, 土壌が 0.3 ppb であった。

環境中の排出基準は 0.005 mg/L (5 ppb) 以下であるため、水試料については水銀含有物として認定した。また土壌の水銀濃度は環境基準と比べ 1/50000 の値を示したことから、土壌への暴露・汚染はないと判断した。

厚生労働省の安全データシート（厚生労働省ウェブサイト）によれば、水銀の溶解度は 0.06 mg/L (25℃の水) と報告されている。つまり水に対する溶解度が 60 ppb である。今回測定したポッド内の水の水銀濃度はそれぞれ 29 ppb と 11 ppb であった。ポットの封入水が、長年、水銀に接していたことを踏まえれば、溶解度に近い濃度に達していたことは当然の結果であるとも言える。今回の分析値は、水銀の水に対する溶解度の性質を反映した結果となった。

水銀の測定結果から、水管傾斜計に封入された金属水銀のみならず、封入された水も回収し、適切に廃棄する必要があることが分かった。

### 水管傾斜計に含まれる水銀 および水銀含有水の回収について

2021 年 7 月 8 日に、水管傾斜計の撤去に関する作業手順の検討や、必要な工具類の確認を行うための予備調査を行った。

コロナ禍である当時、東京大学における研究の活動制限のレベルは 1 (2022 年 4 月現在の活動制限指針レベル B に相当) であり、複数人による公用車での出張に対する制限はなかった。水銀暴露に対する防護の他、コロナ対策にも最大限の注意を払い、撤去作業に着手した。この日の作業は、筆者らにとって初めての水管傾斜計の撤去作業であり、古い機器ゆえに解体マニュアルなども無いため、効率良く作業を進めることが出来なかった。また、ガラス管の接合部分が、特殊な形状の金属部品でかしめられた上に熱溶着されていることが判明した。他の解体方法についても検討したものの、今回持参した通常の観測機器の保守作業で使用する工具類では、安全に分解出来ないと判断した。

しかしながら、5 月 31 日の試料採取において、傾斜計のポットおよび水管を満たしている封入水は、ポットの上蓋を外すことで回収可能であることを確認している。そのため、封入水の回収を以下のように行った。始めに、ポットとガラス管の接合部に紙粘土を貼り付け、ポットとガラス管の水の行き来を遮断した。次に、スポイトを用いてポット内の水を吸い取り、ポリバケツに一時的に回収した。この際、水から虫や腐食金属の破片などを分離するため、キムワイブをフィルターがわりに漏斗にセットし、濾過を行いながら作業を進めた。ポットの水を回収したのち、紙粘

土を取り除き、ガラス管内の水をポットに導入し、封入水の回収を繰り返した。ガラス管は内径約 1 cm, 全長約 20 m であり、合計 9 L の水銀含有水の濾過・回収を行った。ポリバケツに一時回収した封入水は持参した A 分類（水銀溶液専用）のタンクに移し替え、移動中の水漏れ対策を万全にし、地震研究所へ持ち帰った。同様に、回収作業で封入水に接したキムワイブなどの紙類やビニール類、金属類も水銀含有物となるため、素材ごとに袋に回収し、一般廃棄物と区別して保管した。

2021 年 8 月 3 日に、改めてガラス管の切断・撤去と金属水銀を含むポットの回収を行なった。当日の東京大学における研究の活動制限のレベルは 0.5 (2022 年 4 月現在の活動制限指針レベル A 相当) まで下がっていたが、前回同様、水銀暴露に対する防護の他、コロナ対策にも最大限の注意を払って撤去・回収作業を行なった。

前回の作業で、ガラス管の接合部分からの取り外しが出来ないことが判明したため、持参したガラス切りでガラス管を約 1.5 m ずつに切断した。ガラス管は一般廃棄物として処分した。残る 2 つのポットも台座から取り外し、封入された水銀が漏れ出ないように厳重に封をし、パール缶に入れて所に持ち帰った。前回持ち帰らなかった水銀含有物の紙類やビニール類、金属類についても同様に持ち帰った。

以上により、観測所から水管傾斜計を撤去・回収する作業が終了した。

### 本学の実験系廃棄物の廃棄手続きについて

筑波地震観測所から回収してきた金属水銀および水銀含有物について、本学の環境安全指針（東京大学環境安全本部、2020）に従い廃棄手続きを行なった。

今回の回収物は、実験系廃棄物の中の化学的有害廃棄物に相当する。化学的有害廃棄物はその性状（液状または固形）によって廃棄手続きが異なる。水銀系廃棄物のうち液体のものは A 分類廃液として黄色・10 L 型の指定ポリ容器に入れ排出する規定となっている。しかし、金属水銀を含む水銀系固形廃棄物に関しては S 分類廃棄物として排出する必要がある。このため、回収してきた傾斜計の封入水は A 分類として、その他の金属水銀や紙類、ビニール類、金属類は S 分類として、別々に廃棄手続きを行った。

筑波地震観測所から回収した廃棄物の手続きは 2021 年 10 月に行われ、滞りなく適切に終了した。

### 他の水管傾斜計の撤去について

本業務での経験を活かし、観測が終了している水管傾斜計の撤去を順次進めている。2021 年 10 月 4~6 日にかけて、弥彦地殻変動観測所の横坑に設置された読み取り型水管傾斜計の撤去および水銀含有物の回収を行った。また、2023 年度以降の予定として、油壺地殻変動観測所および富士川

地殻変動観測所に設置されている水管傾斜計の撤去も行う予定である。

## ま と め

・筑波地震観測所に設置された水管傾斜計について、機器撤去の事前作業として、機器の封入水および設置場所の土壤に含まれる水銀含有物の濃度測定を行なった。封入水の水銀濃度は最大で 30 ppb、土壤の濃度は 0.3 ppb であった。水銀の排出基準に照らし、封入水は水銀含有物として認定し、土壤については水銀の暴露や汚染は無いと判断した。

・水管傾斜計から回収した水銀および水銀含有物について、東京大学の規定に従い適切な排出を行なった。

・筑波地震観測所での経験を活かし、弥彦地殻変動観測所の水管傾斜計の撤去も既に行なっている。また 2023 年度以降、油壺地殻変動観測所および富士川地殻変動観測所の水管傾斜計の撤去も行う予定である。

謝 辞：水管傾斜計の撤去作業にあたり、藤田親亮技術専門職員には広範に渡る助言と協力を頂きました。水銀の濃度分析および本稿の執筆に関して、中井俊一教授には有益な助言を数多くいただきました。本稿を査読して頂いた平賀岳彦教授ならびに鈴木雄治郎准教授の両名に加え、技術研究報告編集委員の方々には本稿の改善にあたり多岐にわたる有益なご指摘を頂きました。ここに謹んで謝意を表します。

## 文 献

Aoki, Y., P. Segall, T. Kato, P. Cervelli and S. Shimada, 1999, Imaging magma transport during the 1997 seismic swarm off the Izu Peninsula, Japan, *Science*, **286**, 927-930, doi : 10.1126/science.286.5441.927.

萩原尊礼, 1975, III-6 地震研究の諸断面, 東京大学地震研究所 (編) 「地震研究所創立五十周年の歩み」, 文献社, 108-113.

石井 紘・山内常生・松本滋夫, 2001, 最新の地震・地殻変動計測システムによる地震前兆現象の検出, 号外地球, **33**, 188-196.

岩田孝行・野口和子, 2000, 東京大学における地震観測および機械式地震計の名称と分類について, 震研技報, **6**, 78-94, doi : 10.15083/00032241.

環境省ウェブサイト, 環境基準, <https://www.env.go.jp/kijun>, (参照 2022-11-09).

笠原慶一, 1972, 「地殻変動連続観測テキスト その2」, 講義配布物, 2頁.

笠原慶一, 1977, 移動性地殻変動の諸様相, 日本地震学会講演予稿集 1977 年度秋季大会, 83.

笠原 稔, 1981, えりもで観測された 1973 年根室半島沖地震前後の地殻歪の異常変化, 測地学会誌, **27**, 282-288, doi : 10.11366/sokuchi1954.27.282.

国土地理院ウェブサイト, 基準点・測地観測データ, GEONET GNSS 連続観測システム, <https://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/eiseisokuchi41012.html>, (参照 2022-09-06).

厚生労働省ウェブサイト, 職場のあんぜんサイト, 安全データシート, 水銀, <https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/gmsds/7439-97-6.html>, (参照 2022-09-06).

Nakai, S., 2021, Boron determinations of silicate reference rocks by the isotope dilution method in a high-background environment, *Geochem. J.*, **55**, 27-32, doi : 10.2343/geochemj.2.0614.

小原一成, 2007, 深部低周波波動に同期する短期的スロースリップイベントの検出—防災科研 Hi-net 傾斜観測による成果—, 測地学会誌, **53**, 25-34, doi : 10.11366/sokuchi1954.53.25.

東京大学地震研究所地殻変動研究部門富士川地殻変動観測所・油壺地殻変動観測所, 1981, 3-12 地殻活動総合観測線 (南関東) について, 地震予知連絡会会報, **25**, 82-87.

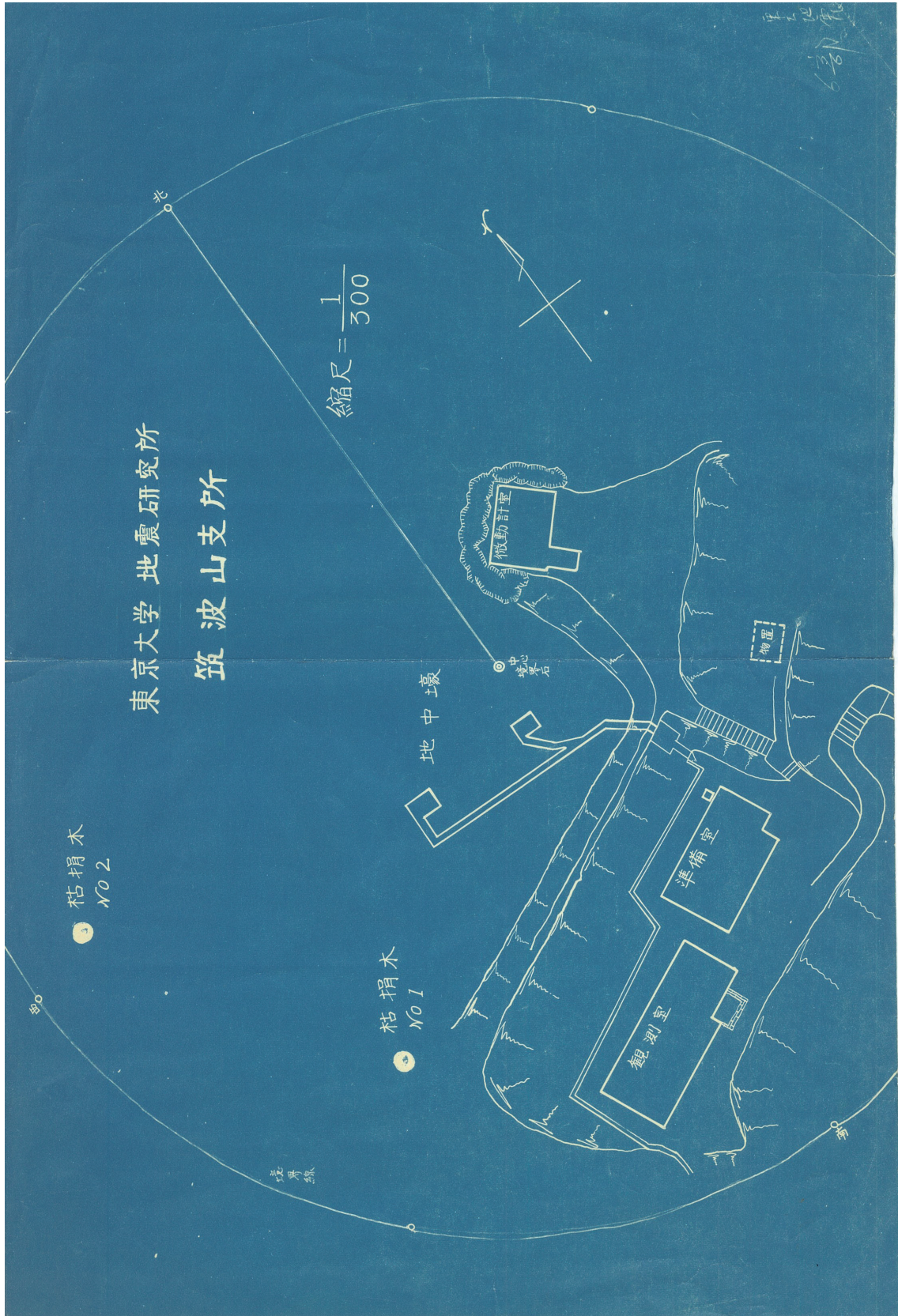
東京大学環境安全本部, 2020, 「環境安全指針 第三部 廃棄物管理編」, 27-40 および 83-84.

稲垣和三, 2008, Chapter 5 河川水・底質の分析, 5-5 試料の前処理, 5-6 標準液の調整, 山本道久 (監)・公益社団法人日本分析化学会関東支部 (編), 「ICP 発光分析・ICP 質量分析の基礎と実際—装置を使いこなすために—」, オーム社, 136-146.

渡邊唯夫・千葉平八郎・加藤育子, 1996, 筑波地震観測所の歴史と地震観測について, 震研技報, **1**, 83-86, doi : 10.15083/00032300.

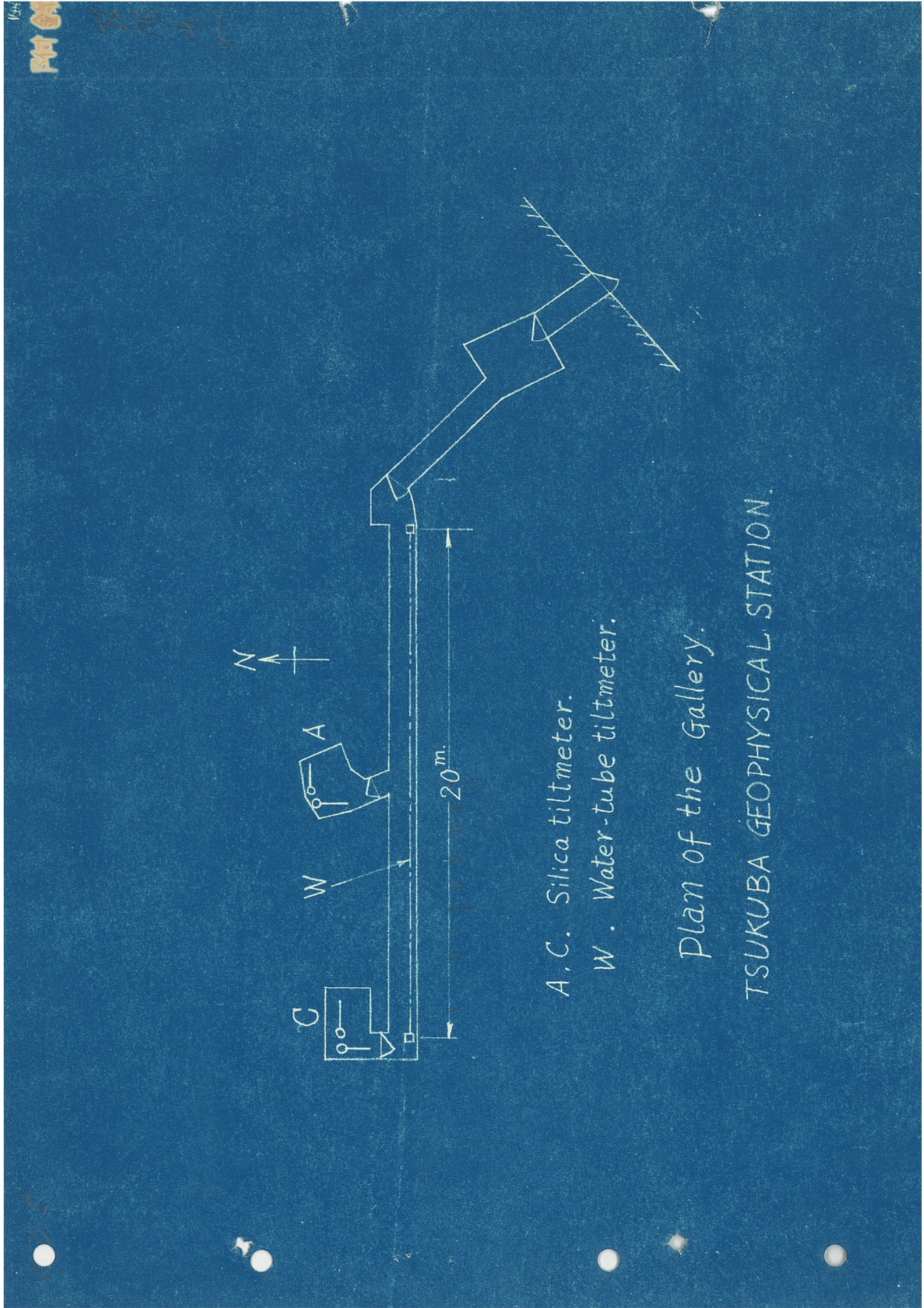
Yamauchi, T., 1989, Earthquake occurrence and temporal variations in Earth tidal strain amplitudes, 測地学会誌, **35**, 149-157, doi : 10.11366/sokuchi1954.35.149.





参考資料 1. 筑波山支所 局舎等配置図





参考資料 2. 地中壕 設計図