

ウィーヘルト地震計の修復について

○立花健二、鈴木和司、増田忠志、石川秀蔵、鳥居龍晴、松下幸司

教育・研究技術支援室 装置開発技術系

概要

ウィーヘルト (Wiechert) 大型地震計はドイツで1904年から1909年の間に製作された地震計である。1928年に4台 (水平動・上下動地震計がセットで4組) 輸入されて、その中の一台が京都大学地球熱学研究施設 (大分県別府市) に設置され、1975年の大分県中部地震で損傷するまで使用されていた。早く壊れたことが幸いして、記録装置などがそのまま原型を保つことが出来たのである。その後、研究所公開などで展示され、同施設のシンボリック的存在であったという。このような貴重な地震計が2007年3月、名古屋大学に移管されることになり、分解して輸送された (図1)。地震計の外観と仕様を図2、図3に示した。



図1 分解して運ばれた地震計

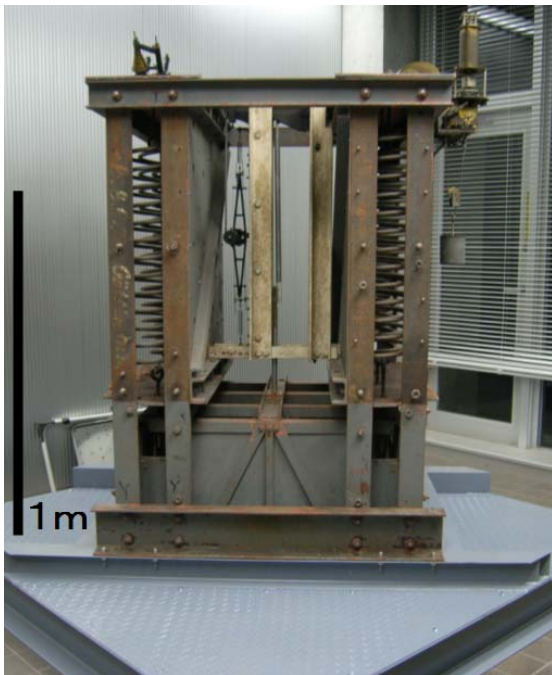


図2 ウィーヘルト上下動地震計

錘の質量 1300kg

固有周期 ~3.5秒

倍率 (拡大率) 150倍~230倍

記録方式 煤書 (重錘時計送り機構付)

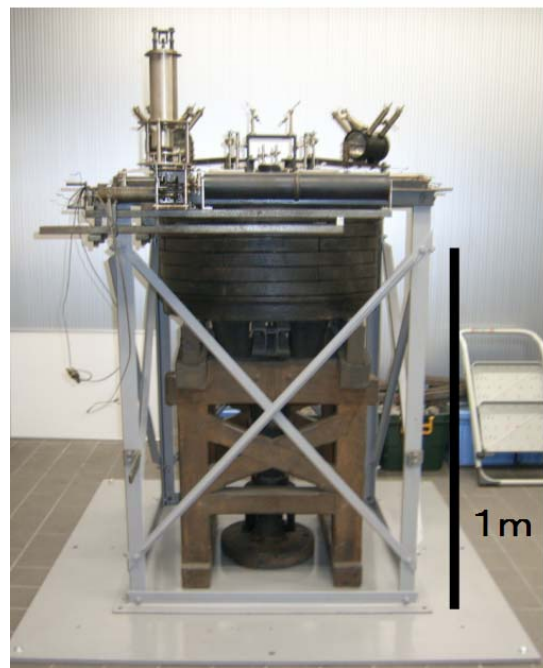


図3 ウィーヘルト水平動地震計

錘の質量 1000kg

固有周期 ~8秒

倍率 (拡大率) 100~300倍

記録方式 煤書 (重錘時計送り機構付)

製作されてから100年近く経過しており、地球物理学の発展過程で大きな役割を果たした貴重な資料でもある地震計を修復する機会を得たので、動作原理や修復作業で特に感じたこと等を報告する。

1 ウィーヘルト地震計の構造

1.1 ウィーヘルト上下動地震計の構造

ウィーヘルト上下動地震計は、図4に示すように質量約1300kgの錘を左右各4本、計8本のバネで吊下げた構造をしている（図では左右各1本に省略している）。実際の錘は鉄製の箱に直径30mm長さ760mm程度で質量約3kgの鉄丸棒298本と碎石200kgを詰めたものである。なお、ドイツでは鉄丸棒を使わずに比重の大きな岩石（バライト）を詰めて錘にしていた。

錘の動き（上下方向）は、機械的な増幅機構（テコ）によって150倍から230倍に拡大され、制振器を経て煤紙に記録される。

1.2 温度補正機構と固有周期延長機構

ウィーヘルト上下動地震計の興味深い機構として温度補正機構と固有周期延長機構がある。

温度補正機構は、気温変化が地震計の記録に与える影響を補正する機構である。地震計周囲の温度が変わると、錘を吊下げているバネが伸縮して錘の位置が変化する。錘の位置の変化は、テコで増幅（200倍程度）されて記録部では大きな“ゼロ点ズレ”を起こす。仮に温度が1℃上昇すると、バネが伸びて錘は約40μm下がる計算からわかる。わずかに40μmの錘の位置変化がテコで増幅されて、記録部では約8mmのゼロ点ズレを生じるのである。

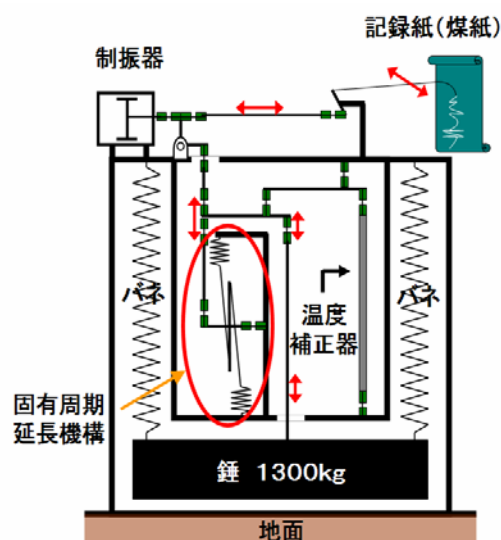


図4 ウィーヘルト上下動地震計の構造

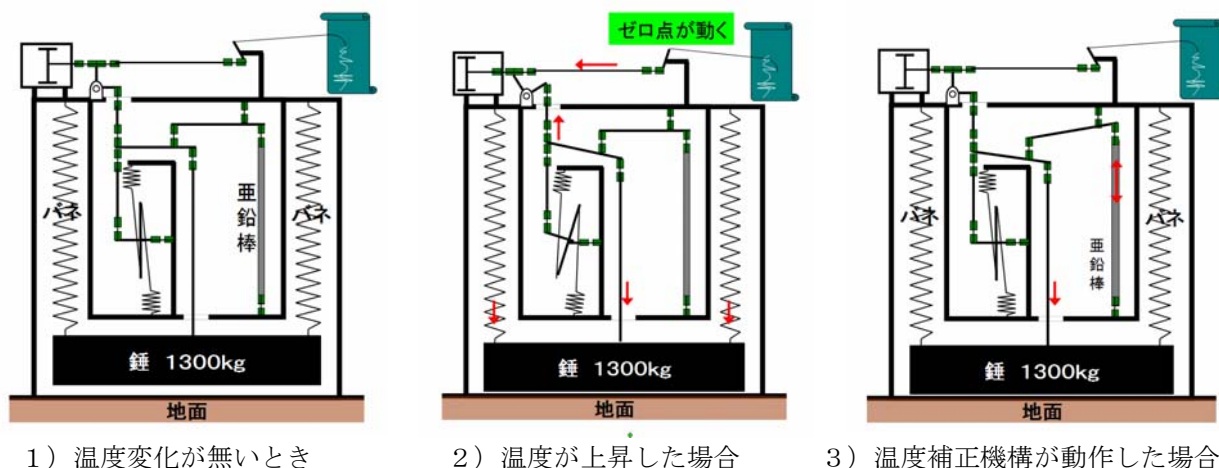


図5 温度補正機構の動作説明

図5は左から1) 温度変化の無い場合、2) 温度が上昇した場合、3) 温度補正機構が動作した場合を表している。温度補正機構は亜鉛棒が使われており、亜鉛の熱膨張係数が鉄の3倍程度大き

表1. 線膨張率の比較

	熱膨張率 $\times 10^{-6}$ [K ⁻¹]
軟鋼	11.8
亜鉛	30.2
アルミニウム (参考)	23.1

なことを利用し（表1）、テコを組み合わせて温度の影響を補正していることがわかる。

次に固有周期延長機構について説明する。周期の長い地震波を記録するためには、地震計の固有振動周期を長くする必要がある（固有振動周期が短いと、地震計の錘が地震の揺れと一緒に揺れてしまい、地震計として機能しない）。振動周期を長くするには、錘の質量を増やすか、バネ定数を小さくする。ウィーヘルト垂直動地震計の場合、8本のばね（合成ばね定数32600 [N/m]）と1300kgの錘からなる振動系と考えられ、固有振動周期 T_n は1.3秒程度である。固有振動周期 T_n は次の式で求まる。

固有周期 T_n の式

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

（質量 m [kg]、ばね定数 k [N/m]）

いま、固有振動周期を伸ばすためにバネ定数 k を小さくする方法を考察する。仮にバネ定数を半分にするると固有振動周期は1.8秒程度（1.4倍程度）に伸びる。しかし、バネの伸びが大きくなり地震計自体が大きくなるので、この方法は現実的でない。また、錘を増やすのも限界がある。そこで、固有振動周期を伸ばすための特殊な機構が考案された。

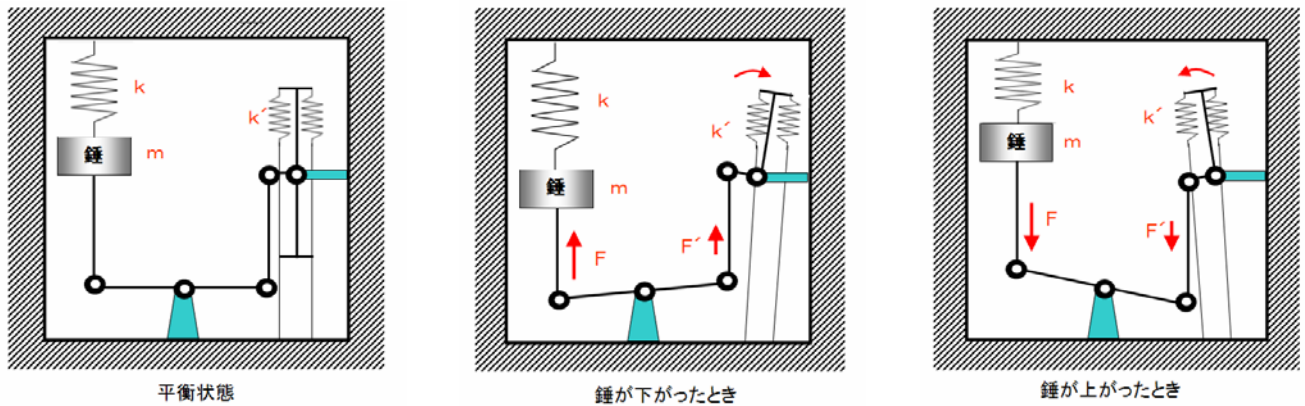


図6 固有周期延長機構の動作説明

図6は固有周期延長機構の動作を説明するモデルである。図中左側はバネと錘、右側が固有周期延長機構である。固有周期延長機構は、垂直棒の上下両端にバネが取り付けられており、棒の上端はバネによって下方へ引かれ、棒の下端はバネによって上方へ引っ張られている構造になっている。この棒は真中を中心に回転するようになっていて、この棒が少しでも傾くと、更に傾く方向へ力が働くという不安定な状態にある。これが負のバネ定数として働いて、1300kgの錘を吊下げているバネの安定を弱める。

固有振動周期 T_n の式を、固有周期延長機構の動作を含めて示すと以下ようになる。

固有周期 T_n の式(固有周期延長機構あり)

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k-k'}}$$

（質量 m [kg]、ばね定数 k [N/m]）

バネ定数 k が固有周期延長機構のバネ定数 k' で弱められる（ k' は固有周期延長機構全体を一つの不安定バネと考えた時のバネ定数）。このように、バネ定数を調整出来るので、固有周期を伸ばす事ができる。

1.3 ウィーヘルト水平動地震計の構造

ウィーヘルト水平動地震計は、図7に示すように、一種の倒立振り子である。この倒立振り子の錘は、160kgの振り支柱に30kgの扇形状錘28枚を円筒状に積上げたもので、合計1000kgの質量がある。最下部の支点から錘の重心までの長さは約1mである。

この倒立振り子の支点はカルダン継手と同じ構造であり、板バネ4枚を使用して、上部の錘がX・Y方向に損失無く揺れるように工夫されている。

倒立振り子の上部には振動を伝えるために2本の腕が伸びており（XYの2成分）、倒立振り子の微小な揺れはテコにより100倍～300倍に拡大され、制振器（後述）を経て、煤紙（灯油等を燃焼させた時に発生する“スス”を付着させた紙）を描針で引掻くことにより記録される。煤紙は昔の重錘式時計のような装置によって送られ、また一定時間経過ごとに目印が記録される仕組みになっている。

固有振動周期が8秒と長いことから想像出来るように、逆立振り子の復元力が弱いためにゼロ点調整等の保守や調整に毎日苦労されたと聞いている。また、有感地震が発生すると倒立振り子が倒れるので（完全に倒れると危険であるため、錘の下に頑丈な木製の台座がある）、再び測定できる状態にするのも大変だったと聞く。

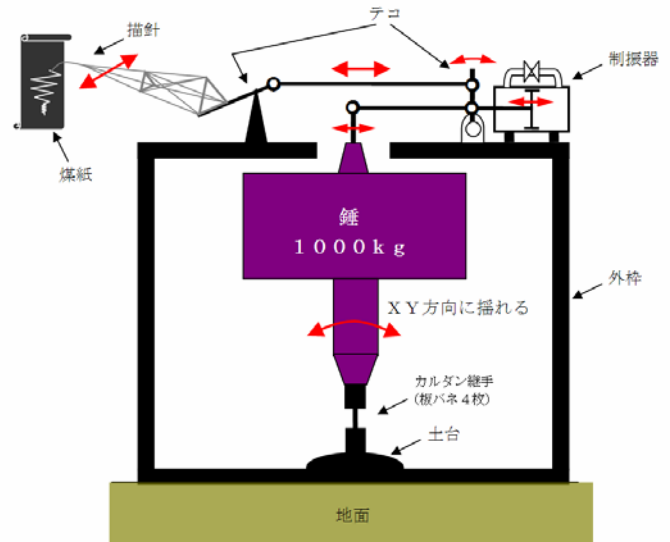


図7 ウィーヘルト水平動地震計の構造

2 地震計部品の複製

ウィーヘルト地震計の復元作業では、破損した部品であっても出来る限り修理し、修理不能な部品の場合には、出来る限りオリジナルに近い部品を新たに製作して使用した。

特に破損が多かったのは、板バネである。ウィーヘルト地震計が開発された時代は、電気的な増幅技術が未発達であった。機械的な方法によって、遠方で発生した地震による僅かな揺れを損失なく増幅する必要があったので、テコの支点には大小様々な板バネが使われている。最も小さな板バネは、バネ部の板厚が0.2mmと非常に薄い。100年前の工作機械でどのように加工したのであろうか。これらの板バネが折損していたので、ワイヤーカット放電加工機を用いて同等品を製作した。

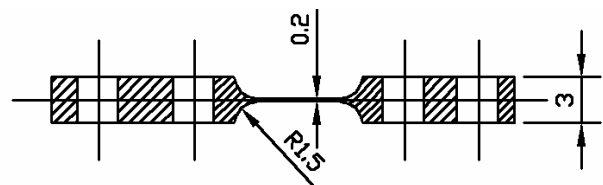


図8 板ばね（ばね部分は厚さ0.2mmである）



図9 製作した板バネ

3 ウィーヘルト垂直動地震計の模型製作

ウィーヘルト垂直動地震計の特徴の一つとして、固有周期延長機構があることを先に述べた。この機構の動作が非常に工夫されていて興味深いので、動作原理がわかりにくいので、説明するためのモデルを製作した。モデルの外観と構造図を図10に示す。

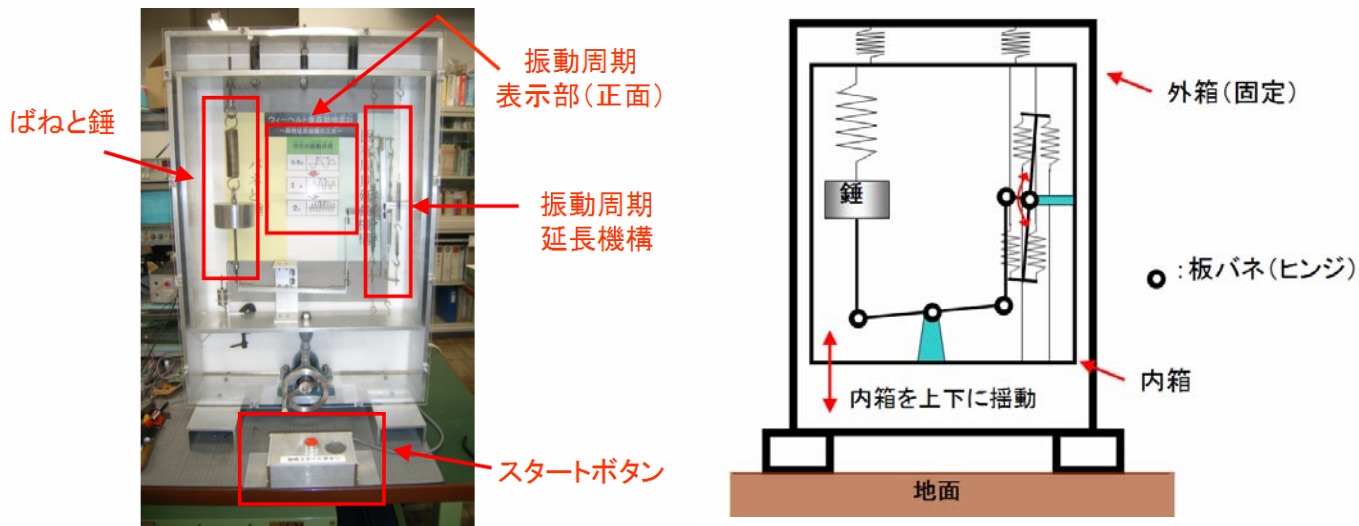


図10 製作した地震計モデル (右：構造の略図 左：外観)

モデルの構造について説明する。アルミニウム板材を組合わせて作った外箱の中に内箱がバネで吊り下げられている。内箱の中には2kgの錘をバネで吊るしたものに固有周期延長機構が連結されており、ウィーヘルト上下動地震計の構造を模している。この内箱全体をカム機構によって上下に振動させることで実際の地震の振動を模擬している。内箱を上下に振動した時、固有周期延長機構の働きで錘は動かず、不動点となることを確認できる。

見学者は、ボタンを押すことにより、音声案内付きで固有周期延長機構の動作を見ることが出来る。

4 今後の予定

ウィーヘルト水平動・上下動地震計の復元は、ほぼ完了した。古い地震計であるが、その反面、現在の地震計と比較して動作原理がわかり易い。100年前の地震計と現在の地震計の比較なども技術の進歩が目当たりに出来て面白いと考える。展示の方法、地震計の原理、そして開発された背景などの説明にも工夫したい。

貴重な資料を譲っていただいたのであるから、名古屋大学の地震研究のシンボリック存在として大事にしていきたい。